

André Luiz Paza

**ANÁLISE DE FADIGA EM UMA MOLA DE ACETAL
HOMOPOLÍMERO.**

Dissertação submetida ao Programa
de pós-graduação da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Dr. Edison da
Rosa

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Paza, André Luiz

Análise de fadiga em uma mola de acetal homopolímero. /
André Luiz Paza ; orientador, Edison da Rosa -
Florianópolis, SC, 2013.

117 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Fadiga. 3. Polímeros. 4.
Wohler. 5. Neuber. I. Rosa, Edison da. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

André Luiz Paza

**ANÁLISE DE FADIGA EM UMA MOLA DE ACETAL
HOMOPOLÍMERO.**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 04 de Dezembro de 2013.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr. Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Edison da Rosa, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D.Sc.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Lauro César Nicolazzi, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Gean Vitor Salmória, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Carlos Rodrigo de Melo Roesler, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a Deus, a minha esposa Jennifer e aos meus filhos Julia e Erik que me deram toda a força necessária para que o mesmo pudesse se realizar.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado à força e a determinação necessárias para que conseguisse alcançar mais este objetivo.

Agradeço também a Zen S/A, pelo apoio durante todo o curso e durante a execução deste trabalho, principalmente ao meu gestor Cristiano Foppa pelos incentivos e ao meu amigo Alvaro Michelotti pelo constante aprendizado e pelas discussões sobre os temas e assuntos abordados pelo curso nas longas horas de viagem até a UFSC, discussões estas que contribuíram muito para as ideias aqui desenvolvidas.

Aos professores do POSMEC, por todos os ensinamentos recebidos no decorrer das disciplinas, principalmente ao Professor Edison da Rosa pela orientação dada a este trabalho.

A equipe da Virtual CAE, principalmente ao Sr. Leandro Garbin e ao Sr. Valmir Fleischmann, que mesmo não utilizando os recursos por eles disponibilizados na redação final deste trabalho contribuíram muito para a realização do mesmo.

E finalmente aos meus colegas de classe que foram muitos, durante as disciplinas cursadas, de diferentes áreas e empresas e que, contribuíram cada um de sua maneira às vezes até inconscientemente para a realização deste trabalho.

“Tudo posso naquele que fortalece”

(Filipenses 4:13)

RESUMO

A Competitividade global está aumentando a cada dia e as empresas são obrigadas a , mais do que nunca , se reinventar e inovar, encontrar novas soluções com melhor desempenho e menor custo, além de reduzir o *lead time* de desenvolvimento. Este é o cenário da indústria automotiva, o foco deste estudo, onde para superar essas barreiras a busca de novas tecnologias, materiais e conceitos de produtos são muito importantes. Pesquisas com apoio de *softwares* e métodos de análise estão em constante crescimento nos últimos anos devido à evolução tecnológica, permitindo que resultados significativos sejam alcançados. Como consequência novos materiais são constantemente criados, especialmente novos polímeros, com novas propriedades e aplicações, gerando uma demanda de informações para que possam ser utilizados e avaliados em diversos campos da engenharia. Em relação aos estudos de fadiga mecânica, muito importantes devido à exigência de alta durabilidade e geometrias complexas, é perceptível a mudança no projeto baseado nos tradicionais testes com corpos de prova para a avaliação do próprio comportamento do componente. Esta pesquisa foi feita dentro de um fornecedor automotivo globalmente conhecido como um fabricante de impulsos de partida, que é o componente - alvo deste estudo. Neste trabalho foi determinada a vida em fadiga de um componente polimérico chamado MP. Depois disso, uma comparação entre a curva de fadiga do material obtido a partir de fornecedores de polímero e a curva de fadiga do componente real, obtido a partir da equação de análise e os testes experimentais é realizada. O modelo analítico para a MP é definido utilizando os conceitos tradicionais baseados em curva de Wohler e regra de Neuber. Uma análise de elementos finitos é conduzida para encontrar o fator de concentração de tensão. Finalmente, ambos os modelos são validados experimentalmente através de testes em uma máquina servo-hidráulica. As conclusões da pesquisa indicam potenciais contribuições deste tipo de abordagem para o endendimento do comportamento da fadiga da MP, permitindo a avaliação da influência dos fatores de correção sob da curva de vida em fadiga do componente. Além disso, oportunidades para futuros desenvolvimentos melhorando o projeto de MP e a criação um modelo para o comportamento de fadiga MP também são contribuições deste trabalho.

Palavras-chave: Fadiga, Curva de Wohler, Polímeros, Regra de Neuber.

ABSTRACT

Global competitiveness is increasing and the companies are required to, more than ever, reinvent themselves and innovate by finding new solutions with improved performance and lower cost, while reducing development lead time. This is the scenario in the automotive industry, focus of this study; to overcome these barriers search of new technologies, materials and product concepts is very important. Researches supported by software and analyses methods are constantly growing in recent years as a result of the technological evolution, enabling significant results. As a consequence new materials are constantly created, especially new polymers, with new properties and applications, generating a demand of information and input data for engineering calculations in several engineering fields. Regarding mechanical fatigue studies, relevant due to the requirement of high durability and complex geometries, it is noticeable this change from traditional tension tests with specimens by the actual evaluation of the component behavior itself. This research was set within an automotive supplier globally known as a manufacturer of starter drives, which is the target-component for this study. In this work the fatigue life of a polymeric component called MP was determined. After that, a comparison between the material fatigue curve obtained from polymer supplier and actual component fatigue curve, obtained from analytical equation and experimental tests is performed. The analytical model for MP is defined using the traditional concepts based on Wohler's curve and Neuber's rule. The Finite Element Model analysis is conducted to find the stress concentrator factor. Finally, both models are validated experimentally by tests in servo-hydraulic machine. Research conclusions indicate potential contributions of this type of approach to understating MP fatigue behavior, allowing evaluation of correction factors influence in the component fatigue life curve. Furthermore, opportunities for future developments to improve the MP design and create a model for the MP fatigue behavior are contributions of this work.

Keywords: Fatigue, Wohler's curve, Polymer, Neuber's rule.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Impulsor de partida com sistema OWC convencional.	28
Figura 2 – (a) sistema OWC convencional (b) sistema OWC MP	28
Figura 3 – Metodologia de cálculo de fadiga.	37
Figura 4 – Dispositivo para ensaios de fadiga.	38
Figura 5 – Típica curva de fadiga.....	39
Figura 6 – Carregamento alternado.	41
Figura 7 – Carregamento pulsante.....	42
Figura 8 – Carregamento flutuante.....	42
Figura 9 – Carregamento de amplitude variável.	43
Figura 10 – Carregamento de amplitude aleatória.....	44
Figura 11 – Limite em baixo em alto ciclo.....	45
Figura 12 – Típica curva de alto ciclo para vários tipos de aço.....	47
Figura 13 – Planos de deslizamento e estágio de propagação da trinca.....	49
Figura 14 – Marcas de praia durante as fases de desenvolvimento da trinca.	50
Figura 15 – O efeito da tensão média.	52
Figura 16 – Diagrama de Haigh para vidas constantes.....	52
Figura 17 – Critérios de fadiga.....	53
Figura 18 – Curva de alto ciclo do material e a corrigida para o componente.	55
Figura 19 – Fator de sensibilidade ao entalhe.	56
Figura 20 – Hipérbole de Neuber.	58
Figura 21 – Crescimento da aplicação de polímeros em alguns veículos.	59
Figura 22 – Curvas de tensão versus deformação dos polímeros: a)Termorrígidos ,b) Termoplásticos , c) Elastômeros.....	62
Figura 23 – Variação na curva tensão & deformação de polímeros.....	63
Figura 24 – Curvas de fadiga de vários tipos de polímeros.....	64
Figura 25 – Fratura por fadiga em um componente de OS.....	65
Figura 26 – (a) histerese no regime térmico, (b) histerese no regime mecânico, (c) transição do regime térmico para o regime mecânico na curva de fadiga.	66
Figura 27 – Temperatura do PE em função da amplitude de tensão.	67
Figura 28 – (a) modelo do processo inicial de ruptura (b) processo em polímero real	69
Figura 29 – Processo de fratura em polímeros.	70
Figura 30 – Sistema de partida para motores de combustão interna.	71
Figura 31 – Estrutura de um sistema de partida.	72
Figura 32 – Motor de partida.....	73

Figura 33 – Impulsor de partida convencional.....	74
Figura 34 – Ciclo de partida.....	75
Figura 35 – Sistema de roda-livre do impulsor convencional.....	77
Figura 36 – Perfil de came do sistema de roda livre convencional.	78
Figura 37 - Passos para a realização do estudo.	80
Figura 38 – (a) Sistema de roda livre atual, (b) MP.....	81
Figura 39 – (a) Carga no sistema de roda livre atual, (b) Carga na MP81	
Figura 40 – Estados de carga da MP: (a) estado de repouso, (b) estado de montagem, (c) estado de trabalho.	82
Figura 41 – Estrutura química do POM.	83
Figura 42 – Curvas tensão-deformação do POM.	85
Figura 43 – Curvas de fadiga do POM.....	86
Figura 44 – Curva de fadiga adotada nesta pesquisa	87
Figura 45 – Principais características de uma de barra de flexão de secção transversal variável.	88
Figura 46 –Ciclos $Cl1$, $Cl2$ e $Cl3$	90
Figura 47 – Modelo da MP.	93
Figura 48 – Restrição “fixa”; (a) modelo, (b) aplicação.	93
Figura 49 – Carga na MP; (a) modelo, (b) aplicação.	94
Figura 50 – Malha do modelo.	95
Figura 51 – Região de concentração de tensão	96
Figura 52 – Gradientes de tensão global para (a) $Cl1$, (b) $Cl2$ e (c) $Cl3$ 97	
Figura 53 – Gradientes de tensão local para (a) $Cl1$, (b) $Cl2$ e (c) $Cl3$ 98	
Figura 54 – Parte linear da curva tensão-deformação do POM.	100
Figura 55 – Plotagem das curvas obtidas.....	102
Figura 56 – Tensão nos pontos $\sigma_{nCl1'}$, $\sigma_{nCl2'}$ e $\sigma_{nCl3'}$	103
Figura 57 – Bancada de desacoplamento.	104
Figura 58 –Dispositivo de testes.	105
Figura 59 – Características do funcionamento do dispositivo de testes.	106
Figura 60 – Dispositivo de testes com MP.....	107
Figura 61 – (a) Fratura experimental (b) Região da fratura apontada pelo MEF.	108
Figura 62 – Comparação gráfica entre N' - e Nem	110
Figura 63 – Comparação entre os resultados (a) e a figura 17(b).	111
Figura 64 – Análise da curva Nem em comparação a curva N'	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Desenvolvimento cronológico da teoria de fadiga.....	35
Tabela 2 – Normas sobre ensaios de fadiga	39
Tabela 3 – Valores de “ f_2 ” adotados.....	79
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do POM.....	84
Tabela 5 – Propriedades adotadas por este trabalho.....	87
Tabela 6 – Valores de q_1	89
Tabela 7 – Valores de Tensão gerados por “ f_{21} ”, “ f_{22} ”, “ f_{23} ”.....	90
Tabela 8 – Caracterização dos ciclos Cl_1 , Cl_2 e Cl_3	90
Tabela 9 – Valores de NCl_1 , NCl_2 e NCl_3	91
Tabela 10 – Comparação dos modelos analíticos e MEF.....	97
Tabela 11 – Comparação entre as tensões globais, locais e os valores de kt	99
Tabela 12 – Comparação entre σ_{Cl} e $\sigma_{Cl'}$	99
Tabela 13 – Comparação entre σ_{Cl} , $\sigma_{Cl'}$ e $\sigma_{nCl'}$	103
Tabela 14 – Valores de NCl_1 , NCl_2 e NCl_3	104
Tabela 15 – Detalhes dos testes.....	108
Tabela 16 – Resultados dos ensaios	109
Tabela 17 – Comparação entre N' - e Nem	110
Tabela 18 – Comparação entre σ_f , σ_{fe} e kun	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

POM - Polióxido de Metileno ou Acetal
OEM - Original Equipment Manufacturer
MP – Mola de Polímero
OWC - One Way Clutch
FEM - Finite Element Method
MEF - Método de elementos finitos
PE - Polietileno
PS - Poliestireno
PVDF - Poliuretano
PA66 - Poliamida 66
RPM - Rotações por minuto
CPM - Ciclos por minuto
EP - Resina epóxi
PET - Poli(etilenterftalato)
PPO - Poli(óxido de fenileno)
PMMA - Poli(metacrilato de metilo)
PP - Polipropileno
PTFE - Poli(tetrafluoretileno) (teflón)

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta\sigma$ - Intervalo de tensões

σ_{max} -Tensão máxima

σ_{min} - Tensão mínima

σ_a - Tensão alternada

σ_m - Tensão média

R - Razão da tensão média

A - Razão da amplitude

σ_n - Tensão alternante para 10^3 ciclos

σ_f - Tensão limite de fadiga ou tensão para 10^6 ciclos

σ_c - Tensão atuante no componente

N - Número de ciclos

$\Delta\varepsilon_p$ = Parcela de deformação plástica

$\Delta\varepsilon_e$ = Parcela de deformação elástica

m - Constante do material em relação ao equacionamento de alto ciclo

C - Constante do material relação ao equacionamento de alto ciclo

N_f - Número de ciclos para falha no equacionamento de baixo ciclo

B - Constante do material em relação ao equacionamento de baixo ciclo

M - Constante do material em relação ao equacionamento de baixo ciclo

b - Constante do material em relação ao equacionamento de baixo ciclo

c - Constante do material em relação ao equacionamento de baixo ciclo

N_{tr} - Número de ciclos de transição

$\Delta\varepsilon$ - Intervalo de deformações

σ_R - Tensão de ruptura

σ_Y - Tensão limite de escoamento

σ'_f - Tensão limite de fadiga corrigida

k_1 - Iésimo fator de correção

k_n - Fator de concentração de tensão em fadiga

k_t - Fator de concentração de tensão

k_f - Fator de concentração de tensão em fadiga para vida infinita

q - Fator de sensibilidade ao entalhe

k_σ - Fator de concentração de tensão inicial

k_ε - Fator de concentração de deformação inicial

σ_0 - Tensão inicial

ε_{max} - Deformação máxima

ε_0 - Deformação inicial

σ - Tensão

ε - Deformação

ξ_d - Energia dissipada por segundo

F - Frequência

M'' - Perda de rigidez

f_1 - Flecha de montagem da MP

f_2 - Flecha cíclica de trabalho da MP

f_2^1 - Primeira flecha cíclica avaliada na pesquisa

f_2^2 - Segunda flecha cíclica avaliada na pesquisa

f_2^3 - Terceira flecha cíclica avaliada na pesquisa

Tg - Temperatura de transição vítrea

Tm - Temperatura de fusão

E - Módulo de elasticidade

ν - Coeficiente de Poisson

b - Altura inicial

b_0 - Altura final

h - Espessura inicial

h_0 - Espessura final

L - Comprimento total

P - Carga sob a mola de flexão

f - Flecha de trabalho de uma mola de flexão

q_1 - Fator de redução de seção de uma mola de flexão

J - Momento de inércia para a seção retangular

W_f - Módulo de resistência

Cl_1 - Ciclo de carga gerado por f_2^1

Cl_2 - Ciclo de carga gerado por f_2^2

Cl_3 - Ciclo de carga gerado por f_2^3

σCl_1 - Valor de tensão para Cl_1

σCl_2 - Valor de tensão para Cl_2

σCl_3 - Valor de tensão para Cl_3

NCl_1 - Valor de N para Cl_1

NCl_2 - Valor de N para Cl_2

NCl_3 - Valor de N para Cl_3

$\sigma Cl_1'$ - Valor de tensão corrigido para Cl_1

$\sigma Cl_2'$ - Valor de tensão corrigido para Cl_2

$\sigma Cl_3'$ - Valor de tensão corrigido para Cl_3

N' - Valor de N corrigido

NCl_1' - Valor corrigido de N para Cl_1

NCl_2' - Valor corrigido de N para Cl_2

NCl_3' - Valor corrigido de N para Cl_3

σCl_{1mg} - Valor de tensão global para Cl_1 gerado por MEF

σCl_{2mg} - Valor de tensão global para Cl_2 gerado por MEF

σCl_{3mg} - Valor de tensão global para Cl_3 gerado por MEF
 σCl_{1ml} - Valor de tensão local para Cl_1 gerado por MEF
 σCl_{2ml} - Valor de tensão local para Cl_2 gerado por MEF
 σCl_{3ml} - Valor de tensão local para Cl_3 gerado por MEF
 $k_t Cl_1$ - Valor de k_t para Cl_1
 $k_t Cl_2$ - Valor de k_t para Cl_2
 $k_t Cl_3$ - Valor de k_t para Cl_3
 k_{tm} - Valor médio de k_t
 $\sigma n Cl'_1$ - Valor de tensão corrigido pela regra de Neuber para Cl_1
 $\sigma n Cl'_2$ - Valor de tensão corrigido pela regra de Neuber para Cl_2
 $\sigma n Cl'_3$ - Valor de tensão corrigido pela regra de Neuber para Cl_3
 D_a - Diâmetro de acionamento do dispositivo de testes
 D_r - Diâmetro de repouso do dispositivo de testes
 N_e - Número de ciclos obtido nos testes experimentais
 R_e - Velocidade de rotação do eixo nos testes experimentais
 t_e -Tempo dos testes nos testes experimentais
 $N_e Cl_1$ - Valor de N_e para Cl_1
 $N_e Cl_2$ - Valor de N_e para Cl_2
 $N_e Cl_3$ - Valor de N_e para Cl_3
 N_{em} – Média do número de ciclos obtido nos testes experimentais
 $N_{em} Cl_1$ - Valor de N_{em} para Cl_1
 $N_{em} Cl_2$ - Valor de N_{em} para Cl_2
 $N_{em} Cl_3$ - Valor de N_{em} para Cl_3
 σ_{fe} - Tensão limite de fadiga experimental ou tensão experimental para 10^6 ciclos
 k_{un} - Fator de correção único

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	A EMPRESA ALVO	28
1.2	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES.....	29
1.3	ESCOPO DA PESQUISA	29
1.4	ESTRUTURA DA PESQUISA	30
2	FADIGA.....	33
2.1	HISTÓRICO	33
2.2	O CÁLCULO DE FADIGA	37
2.2.1	Obtenção da curva de fadiga do material.....	37
2.2.1.1	Ensaio de fadiga	37
2.2.2	Determinação das solicitações envolvidas.....	40
2.2.2.1	Carregamentos de amplitude constante.....	40
2.2.2.1.1	<i>Carregamento alternado.....</i>	<i>41</i>
2.2.2.1.2	<i>Carregamento pulsante.....</i>	<i>41</i>
2.2.2.1.3	<i>Carregamento flutuante</i>	<i>42</i>
2.2.2.2	Carregamentos de amplitude irregular.....	43
2.2.2.2.1	<i>Carregamentos de amplitude variável.....</i>	<i>43</i>
2.2.2.2.2	<i>Carregamentos de amplitude aleatória</i>	<i>44</i>
2.2.3	Seleção do Modelo de fadiga.....	44
2.2.3.1	O modelo tensão versus número de ciclos	46
2.2.3.2	O modelo deformação-número de ciclos	48
2.2.3.3	Mecânica da fratura.....	48
2.2.4	Adequação da curva do material ao componente	51
2.2.4.1	O efeito da tensão média.....	51
2.2.4.1.1	<i>A Parábola de Gerber.....</i>	<i>53</i>
2.2.4.1.2	<i>A Reta de Goodman</i>	<i>53</i>
2.2.4.1.3	<i>A Reta de Soderberg</i>	<i>53</i>
2.2.4.2	Fatores modificadores	54
2.2.4.3	Fator de concentração de tensão	55
2.2.4.3.1	<i>Concentração de tensão no regime elasto-plástico</i>	<i>57</i>
3	POLÍMEROS	59
3.1	CLASSIFICAÇÕES DOS POLÍMEROS	60
3.1.1	Classificação em função do comportamento mecânico e térmico	60
3.1.1.1	Termoplásticos.....	60
3.1.1.2	Termorrígidos	60
3.1.1.3	Elastômeros.....	61
3.1.2	Comportamento mecânico dos polímeros.....	61
3.1.2.1	Relações tensão deformação dos polímeros.....	62

3.1.3	Comportamento em fadiga dos polímeros.....	64
3.1.4	Mecanismo de fratura em polímeros	68
3.1.4.1	Mecanismo da fratura frágil.....	68
3.1.4.2	Mecanismo da fratura dúctil	68
4	O SISTEMA DE PARTIDA DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA.....	71
4.1	ESTRUTURA DO SISTEMA DE PARTIDA.	71
4.1.1	O motor de partida.....	72
4.1.1.1	O impulsor de partida.	76
5	ESTUDO DE CASO	79
5.1	ESCOPO DO ESTUDO	79
5.1.1	Metodologia de trabalho	79
5.2	A MP	80
5.2.1	O ciclo de trabalho.....	82
5.2.2	Propriedades do material.....	83
5.3	MODELO ANALÍTICO	86
5.3.1	Obtenção da curva de fadiga e propriedades do material	86
5.3.2	Determinação das solicitações envolvidas.....	87
5.3.3	Seleção do modelo de fadiga.	91
5.3.4	Obtenção da curva de fadiga do componente	91
5.3.4.1	O modelo de elementos finitos	92
5.3.4.1.1	Restrições do modelo.....	92
5.3.4.1.2	Cargas do modelo.....	94
5.3.4.1.3	Elementos e malha utilizada no modelo	94
5.3.4.1.4	Parâmetros da simulação.....	95
5.3.4.1.5	Resultados.....	95
5.3.4.2	Realimentação do modelo analítico.....	99
5.3.4.3	Aplicação da regra de Neuber.....	99
5.3.4.3.1	Obtenção da equação da curva do material.....	100
5.3.4.3.2	Extrapolação da parte linear da curva	101
5.3.4.3.3	Construção da hipérbole de Neuber.....	101
5.3.4.3.4	Plotagem das curvas e obtenção da intersecção	102
5.4	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	104
5.4.1	O dispositivo de testes.....	105
5.4.1.1	Funcionamento do dispositivo.....	106
5.4.2	Configurações dos testes.	107
5.5	COMPARAÇÕES E DISCUÇÃO DOS RESULTADOS.....	109
6	CONCLUSÕES.....	113
	REFERÊNCIAS.....	115

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno de fadiga historicamente começou a despertar o interesse da comunidade científica em meados de 1850, devido a acidentes de grandes proporções que causaram muitas perdas humanas e materiais, desde então, veem se estudando e aprimorando modelos que o possam prever tal fenômeno.

Grandes nomes como Wohler desenvolveram equacionamentos capazes de modelar o fenômeno em um nível de aproximação satisfatório, equacionamentos estes que foram aprimorados e adaptados ao longo dos anos devido ao advento de novos materiais como compósitos e polímeros.

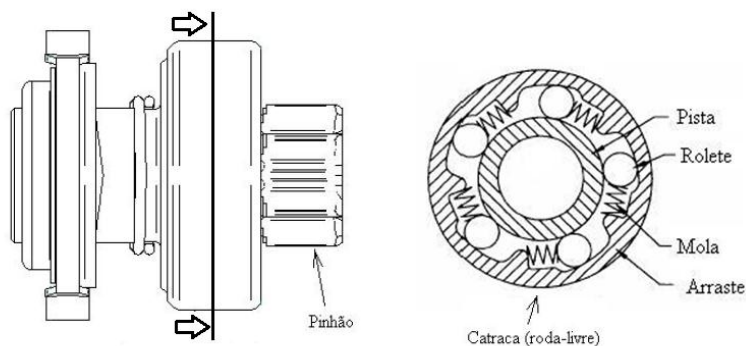
Uma das indústrias que mais se beneficiou com o uso destes novos materiais foi à automotiva, aonde os polímeros vem substituindo materiais como aço e alumínio em diversas aplicações no veículo devido a sua capacidade de redução a massa e a facilidade na fabricação de geometrias complexas, além do baixo custo em relação aos materiais tradicionais, atendendo assim as atuais exigências para a redução de emissões e consumo de combustível.

Ao falar-se de plásticos é difícil não associar de imediato a ideia de um saco de compras, ou um “*tupperware*” doméstico. Esta é, no entanto, uma imagem demasiado redutora de um material cuja popularidade pode levar os menos avisados a associá-lo a produtos de pouco valor. Pelo contrário, o elevado desenvolvimento tecnológico, associado à crescente evolução no mundo da química orgânica, têm permitido um notável nível de utilização destes materiais. De fato, as suas extraordinárias propriedades, versatilidade de tipologia e formas, possibilitam um vasto leque de aplicações, tornando-o num produto moderno, apetecível e cada vez mais importante. (SANTOS, Rui; MARTINS, João Guerra. **Materiais de construção, plásticos**, 2010).

Dentre os sistemas que podem ser otimizados está o impulsor de partida, subsistema do motor de arranque dos motores a combustão que sofreu poucas alterações desde sua invenção em meados de 1920.

O impulsor, ilustrado na Figura 1, utiliza um sistema de roda-livre que é composto na maioria das vezes por roletes e molas helicoidais (descritos em maior detalhe posteriormente no capítulo 4).

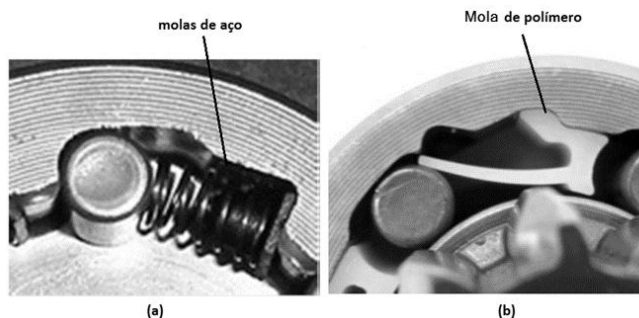
Figura 1 – Impulsor de partida com sistema OWC convencional.



Fonte: Adaptado de Michelotti (2008).

Com o objetivo de aperfeiçoá-lo, a empresa alvo desenvolveu um novo conceito denominado MP, uma mola de flexão de polímero com o objetivo de substituir as tradicionais molas de aço, a MP é ilustrada na Figura 2 e tem a patente requerida pela empresa estando ainda em estado de desenvolvimento.

Figura 2 – (a) sistema OWC convencional (b) sistema OWC MP



1.1 A EMPRESA ALVO

A pesquisa desenvolvida no presente trabalho foi realizada em uma empresa (doravante denominada Empresa Alvo) do ramo de autopeças que desenvolve sistemas e componentes para o sistema de partida de motores de combustão, tanto para o mercado original (OEM) quanto para

o mercado de reposição, tendo entre seus principais clientes Bosch, Remy, Ford e Valeo.

A empresa foi fundada em 1960 e é certificada ISO 9001, ISO TS-1694 e ISO 14001 tendo um parque fabril de aproximadamente 40.000m² de área construída que produz mais de 9 milhões de produtos anualmente.

A principal linha de produtos é a de Impulsores de Partida. São mais de mil aplicações diferentes, para automóveis, caminhões, tratores, motocicletas e embarcações.

Também possui uma linha de polias para alternadores, e tensionadores de correia além de uma unidade de componentes de alumínio injetado.

1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

Esta pesquisa tem como objetivo principal comparar a curva de fadiga do material POM fornecida pelo fabricante de matéria prima com a curva de fadiga obtida para o componente MP, para que isso seja alcançado serão necessários que os seguintes objetivos secundários sejam atingidos:

1. Obtenção da curva da MP através de um modelo analítico e um modelo de elementos finitos;
2. Validação experimental dos modelos através de testes de bancada.

Desta maneira a pesquisa contribui para:

- O melhor entendimento do comportamento em fadiga dos polímeros, especialmente o POM;
- A verificação da aplicabilidade e nível de correlação dos modelos tradicionais de fadiga a novos materiais como os polímeros,
- Auxílio no desenvolvimento de modelos para predição de vida em fadiga nos projetos MP dentro da empresa alvo.

1.3 ESCOPO DA PESQUISA

A pesquisa aqui realizada pretende avaliar a carga realizada pela MP durante o trabalho do impulsor de partida através de três diferentes níveis de tensão (descrito em maior detalhe no capítulo 5) e simular estas cargas experimentalmente através de um dispositivo de ensaio, comparando posteriormente os resultados obtidos.

O escopo de trabalho limita-se a uma abordagem inicial do comportamento em fadiga da MP em condições controladas de ensaio, excluindo, em um primeiro momento, variáveis presentes na aplicação no motor de partida, tais como, temperatura de trabalho, efeitos dinâmicos resultantes da aplicação da carga e ataque químico proveniente da graxa aplicada aos sistemas de roda-livre dos impulsores de partida.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

Para a realização da pesquisa foram utilizados os seguintes recursos:

- *Software* de CAD Solid Edge (Siemens): O *software* permite o modelamento de geometrias em três dimensões, geometrias estas que servem de base para o modelo de MEF.
- *Software* de Simulação Femap/Nastran (Siemens): *Software* de simulação pelo método de elementos finitos que permite simulações de transferência de calor, esforço mecânico e vibrações utilizando o Solver Nastran.
- Laboratório de testes (empresa alvo): Para execução da validação experimental foram utilizados os laboratórios internos da empresa alvo, compostos de bancadas de motores a combustão de diferentes configurações para testes de durabilidade de sistemas de partida; uma bancada de teste de torque de travamento; uma bancada de teste de impacto, entre outros recursos para validação de componentes para impulsores de partida.

A dissertação está estruturada da seguinte forma:

O Capítulo 2 descreve os conceitos de fadiga abordando fatos históricos relacionados ao tema, os tradicionais modelos encontrados na literatura, e o aparato matemático disponível para a elaboração de modelos de fadiga.

O Capítulo 3 descreve os polímeros, sua classificação, conceitos e principalmente seu comportamento mecânico e em fadiga.

O Capítulo 4 descreve o sistema de partida de motores a combustão interna, abordando seu funcionamento, principais componentes e principalmente o impulsor de partida e as suas particularidades.

O Capítulo 5 descreve o estudo de caso realizado com a MP, abordando em maior detalhe o conceito do componente e a construção dos modelos analíticos, de elementos finitos e a validação experimental

de tais modelos, além de trazer uma discussão e comparação dos resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões da pesquisa sobre e as recomendações finais.

2 FADIGA

Designa-se por fadiga, o fenômeno da ruptura progressiva (ou de acumulação de dano) de materiais sujeitos a ciclos repetidos de tensão ou deformação. Uma característica importante da fadiga é que o carregamento não é suficientemente grande para causar a falha imediata. Ao invés disto, a falha ocorre após a ocorrência de um certo número de flutuações do carregamento, isto é, após o dano acumulado ter atingido um valor crítico (LEMOS, **Análise de fadiga em risers flexíveis**, 2005).

De maneira objetiva podemos dizer que fadiga é o dano progressivo causado por ciclos variados de tensão ou deformação ao longo da vida de trabalho de determinado componente levando-o a ruptura.

A falha por fadiga geralmente ocorre com cargas muito abaixo das que causariam uma falha estática ao no componente e está relacionada a tensões alternantes e deformações plásticas, que segundo Lee (2005), causam danos permanentes ao material e consequentemente a formação de trincas.

O estudo deste fenômeno é de grande importância à engenharia, segundo Norton (2010), um famoso relatório do departamento de comércio norte americano publicado na década de 80 diz que cerca de 119 bilhões de dólares foram despendidos em custos relacionados a falhas de todos os tipos de sistemas mecânicos, vários pesquisadores atribuem estas falhas ao processo de fadiga, atualmente estimasse que 90% das falhas de sistemas em serviços estejam relacionadas à fadiga.

Diante destes números se torna evidente a necessidade de entender e estudar maneiras de se prevenir e evitar este tipo de falha sendo de suma importância para a sociedade como um todo, pois evita perdas financeiras e de vidas humanas em acidentes causados relacionados a este fenômeno.

2.1 HISTÓRICO

Os estudos sobre fadiga iniciaram historicamente com Wilhelm Albert um administrador de minas alemão que ficou conhecido em 1829 como o primeiro a documentar o fenômeno que, mais tarde seria chamado de fadiga. O termo fadiga tem origem do latim “fatigare” e significa

cansaço, já que se acreditava que o material “cansava” depois de um determinado número de ciclos.

Segundo Vervoort (2012), os estudos começaram com falhas repentinas em eixos de carruagens e posteriormente em eixos ferroviários, dando destaque ao acidente em Versailles na França em 1842 que matou aproximadamente 60 pessoas e foi o estopim para que o assunto ganhasse escala e fosse tratado de maneira mais séria tanto pelo governo quanto pelos engenheiros da época.

Neste período nomes como Rankine e Wohler, denominado o pai da fadiga, se destacaram e desenvolveram as bases da teoria atual.

Porém, apenas o conhecimento desenvolvido por eles não foi suficiente e em 1952, aconteceram os acidentes com os aviões britânicos “Hallivand Comet”, que foram os primeiros aviões comerciais movidos por motores a jato do mundo, voando com o dobro da velocidade dos demais aviões da época o Comet cumpria apenas rotas curtas devido a sua baixa autonomia.

Estes aviões começaram a apresentar falhas devido ao desgaste da fuselagem provocado pelas cargas relacionadas à despressurização e pressurização da câmara do avião o que originava trincas nas janelas que eram quadradas na época.

Novamente tais acidentes incentivaram os estudos na área que é chamada hoje de mecânica da fratura, investigando desde a formação até a propagação das trincas relacionadas à fadiga.

Desatacaram-se neste período nomes como Miner, Neuber, Cofim, Manson, Paris entre outros.

Desde então com a multiplicação dos materiais e o advento dos polímeros os estudos nesta área concentram-se na caracterização dos materiais e na adaptação das suas especificidades as teorias existentes.

A Tabela 1 apresenta um resumo do desenvolvimento cronológico da teoria de fadiga.

Tabela 1 – Desenvolvimento cronológico da teoria de fadiga.

Ano	Pesquisador	Evento ou realização
1829	Albert	Primeiro a documentar uma falha devido a cargas repetidas.
1839	Poncelet	Primeiro a utilizar o termo fadiga.
1837	Rankine	Discutiu a teoria da cristalização da fadiga.
1849	Stephenson	Discutiu a responsabilidade do produto associada às falhas em eixos ferroviários.
1850	Braithwaite	Primeiro a utilizar o termo fadiga em publicação de língua inglesa, também discutiu a teoria da cristalização da fadiga.
1864	Fairbairn	Relatou os primeiros experimentos com cargas repetidas.
1871	Wöhler	Publicou os resultados de 20 anos de pesquisas sobre falhas em eixos, desenvolveu os ensaios de flexão rotativa e o diagrama S-N e definiu o limite de fadiga.
1871	Bauschinger	Desenvolveu um extensômetro com espelho, com uma sensibilidade igual a 10^{-6}
1886	Bauschinger	Propôs um “limite elástico natural” cíclico abaixo do qual nunca iria ocorrer fadiga.
1903	Ewing/Humfrey	Descobriram linhas de deslizamento, trincas de fadiga e o crescimento da trinca até a falha, mostrando os erros da teoria da cristalização da fadiga.
1910	Bairstow	Verificou a teoria limite elástico natural de Bauschinger e o limite de fadiga de Wöhler.
1910	Basquin	Desenvolveu a lei exponencial para testes de fadiga (a equação de Basquin)
1921	Griffith	Desenvolveu um critério de falha e relacionou a fadiga ao crescimento da trinca

1927	Moore/Kommers	Quantificaram os dados de fadiga de alto-ciclo para diversos materiais em “A fadiga dos Metais”.
1930	Goodman/Soderberg	Determinaram, de forma independente, a influência das tensões médias na fadiga.
1937	Neuber	Publicou a equação de Neuber sobre concentração de tensão em entalhes.
1953	Peterson	Publicou “Fatores da Concentração de Tensão para Projeto” fornecendo uma abordagem considerando os entalhes.
1955	Coffin/Manson	Publicaram, de forma independente, a lei de fadiga de baixo-ciclo baseada na deformação específica (lei de Coffin-Manson).
1961	Paris	Publicou a lei da mecânica da fratura de Paris para o crescimento de trincas de fadiga.
1973	Hashin e Rotem / Sims e Brogdon	Estimaram a fadiga de um compósito submetido à uma condição uniaxial de carregamento em diferentes direções.
1990	Ellyin e El Kadi	Demonstraram que a origem da densidade energética pode ser utilizada como um critério de fadiga.
1994	Ellyin e Fawaz	Modelo capaz de prever a vida de fadiga dos materiais estabelecendo-se em diferentes direções.
1999	Plumtree e Cheng	Desenvolveram um novo modelo de fadiga para compósitos que seja independente do nível de tensão
2001	Plumtree e Petermann	Estimaram a fadiga de um compósito submetido à uma condição uniaxial de carregamento em diferentes direções.
2004	Kawai	Modelo de previsão da vida em fadiga sob uma camada ortotrópica em níveis positivos e negativos de tensão.
2006	M.M. Shokrieh e F. Taheri-Behrooz	Desenvolveram critério para a previsão vida em fadiga para uma camada ortotrópica.

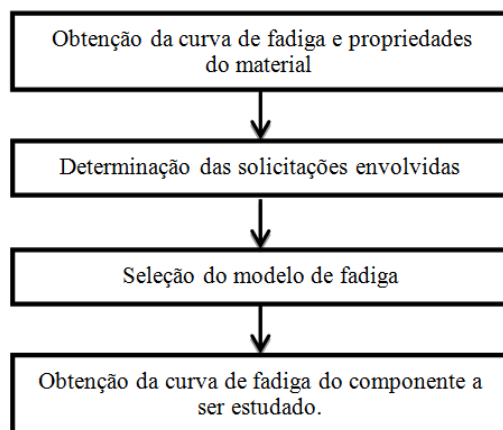
Fonte: Adaptado de Abrahão (2008)

2.2 O CÁLCULO DE FADIGA

O Cálculo ou estimativa de vida de fadiga consiste em obter algumas propriedades do material, estudar as solicitações no componente, selecionar o modelo de fadiga mais adequado e fazer a adequação da curva de fadiga do material as condições de aplicação do componente a ser estudado.

A Figura 3 mostra a metodologia adotada nesta pesquisa.

Figura 3 – Metodologia de cálculo de fadiga.



2.2.1 Obtenção da curva de fadiga do material

Para que se possa estimar a vida em fadiga de determinado componente é necessária como primeiro passo obter a curva de fadiga do material, para isso pode-se efetuar uma consulta a literatura ou em casos onde esta curva não está disponível pode-se obtê-la experimentalmente através de ensaios de fadiga padronizados.

2.2.1.1 Ensaios de fadiga

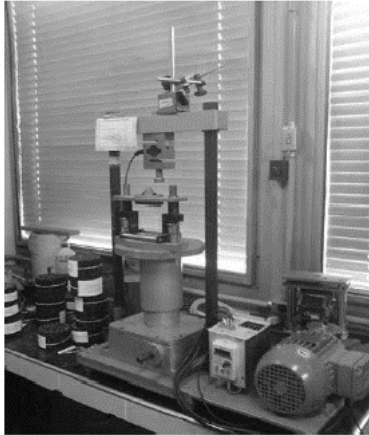
Segundo Rosa (2002), os ensaios de fadiga podem ser divididos em ensaios de tração compressão e flexão rotativa, sendo possível ainda uma combinação de cargas como flexão torção, tração flexão entre outros.

Atualmente o estudo de fadiga é feito tomando por base os dados obtidos nos ensaios de tração compressão com controle de carga na região

de altos ciclos e com controle de deformação na região de baixo ciclo (Rosa, Mecânica da fratura e fadiga, 2002).

Estes ensaios são tipicamente realizados por máquinas servo-hidráulicas conforme ilustrado na Figura 4.

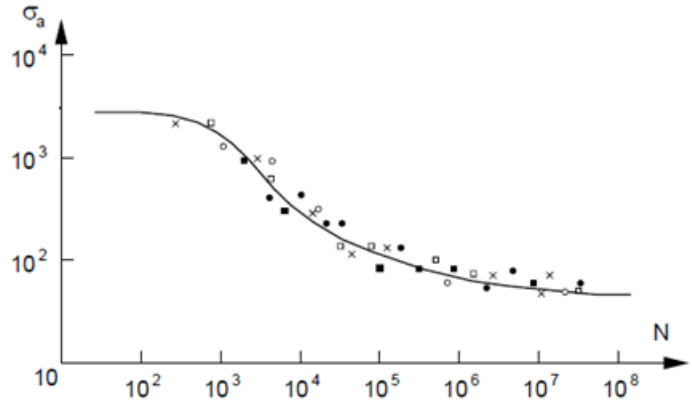
Figura 4 – Dispositivo para ensaios de fadiga.



Fonte: Adaptado de Colim (2006)

O resultado desses ensaios é normalmente exibido em uma curva denominada curva de fadiga do material e plota o número de ciclos em função das tensões ou deformações alternantes. A Figura 5 ilustra uma típica curva de fadiga.

Figura 5 – Típica curva de fadiga



Fonte: Adaptado de Rosa (2002)

Os ensaios de fadiga são regulamentados por diversas normas que indicam, desde, a geometria do corpo de prova até as condições do teste; a Tabela 2 mostra algumas destas normas:

Tabela 2 – Normas sobre ensaios de fadiga

Número ASTM	Assunto Abordado
E 206	Testes e tratamento estatístico dos resultados
E 466	Testes de fadiga axial com amplitude constante
E 467	Verificação de máquinas ensaios axial.
E 468	Apresentação de resultados com amplitude constante
E 513	Teste de amplitude constante, baixo número de ciclos.
E 606	Nomenclatura de ensaios a baixo número de ciclos
E 647	Ensaio de propagação de trincas de fadiga
E 739	Análise estatística das curvas σ -N e ϵ -N
E 742	Testes de fadiga com ambiente agressivo.

Fonte: Adaptado de Rosa (2002)

2.2.2 Determinação das solicitações envolvidas.

Um dos pré-requisitos para que ocorra a falha por fadiga é a existência de cargas variando ao longo do tempo, entender estas cargas é fundamental para a correta avaliação da vida em fadiga.

Segundo Cutrim (2010), os carregamentos são avaliados em relação as suas tensões médias e alternadas, usando como parâmetros os valores médios, mínimas e máximas, ou, a razão desses valores.

Tais parâmetros são definidos pelas equações abaixo:

O intervalo de tensões:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}. \quad (1)$$

A tensão alternada:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2)$$

A tensão média:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (3)$$

Razão da tensão média (também conhecido como fator de simetria do ciclo):

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (4)$$

Razão da amplitude (ou componente alternada):

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (5)$$

Além destes parâmetros os carregamentos podem ser classificados como carregamentos de amplitude constante e de amplitude irregular.

2.2.2.1 Carregamentos de amplitude constante

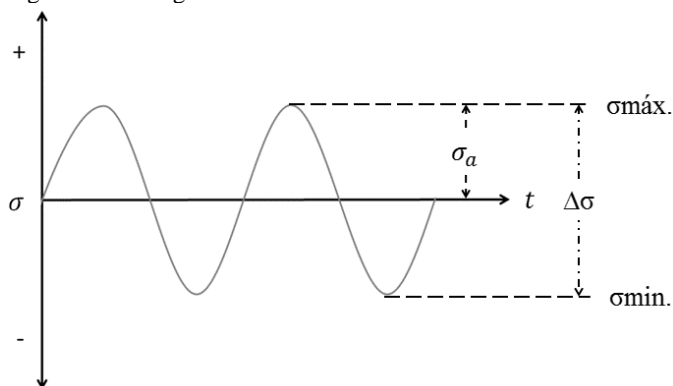
Os carregamentos de amplitude constante podem ser usados diretamente como dados de entrada para o estudo de fadiga sem necessitar

de um tratamento prévio e são classificados como alternado, repetido e flutuante.

2.2.2.1.1 Carregamento alternado

Neste tipo de carregamento temos a tensão média igual à zero, tendo os parâmetros $R=-1$ e $A=\text{infinito}$, tal carregamento é ilustrado na Figura 6.

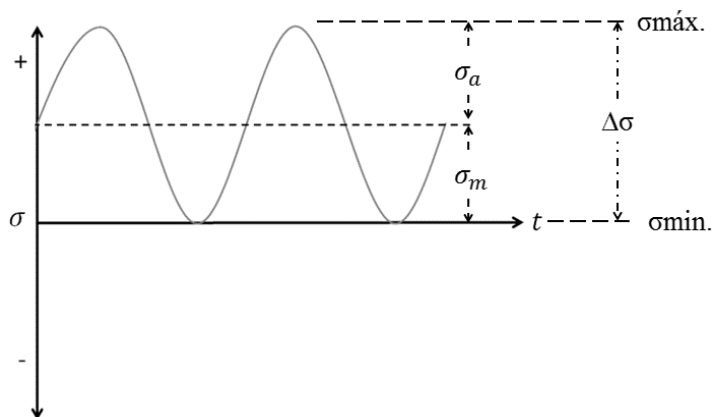
Figura 6 – Carregamento alternado.



2.2.2.1.2 Carregamento pulsante

Neste tipo de carregamento a tensão média varia de zero a um valor máximo e a tensão média é igual à tensão alternada, tendo os parâmetros $R=0$ e $A=1$, tal carregamento é ilustrado na Figura 7.

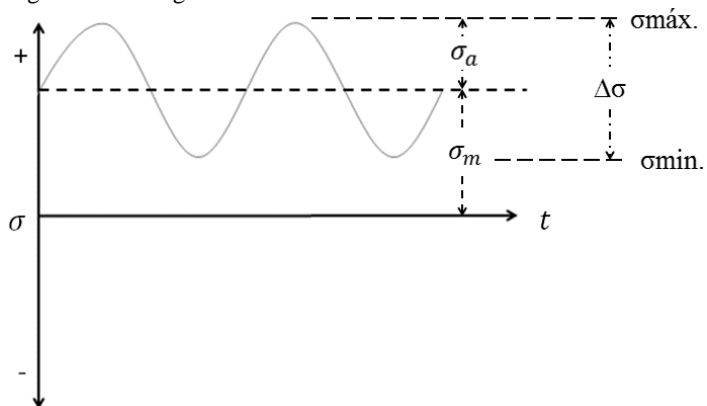
Figura 7 – Carregamento pulsante.



2.2.2.1.3 Carregamento flutuante.

Neste caso todos os valores são diferentes de zero com os valores todos positivos, onde temos que $0 \leq R \leq 1$, tal carregamento é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Carregamento flutuante.



2.2.2.2 Carregamentos de amplitude irregular.

Na maioria casos reais os carregamentos não possuem um ciclo de tensão regular, variando durante a vida do componente e exigindo um tratamento mais complexo para que possam ser usados como dado de entrada em um estudo de fadiga.

Um bom exemplo destes tipos de carregamento são as cargas sofridas pela suspensão de um veículo ou as solicitações em um casco de navio durante uma tempestade.

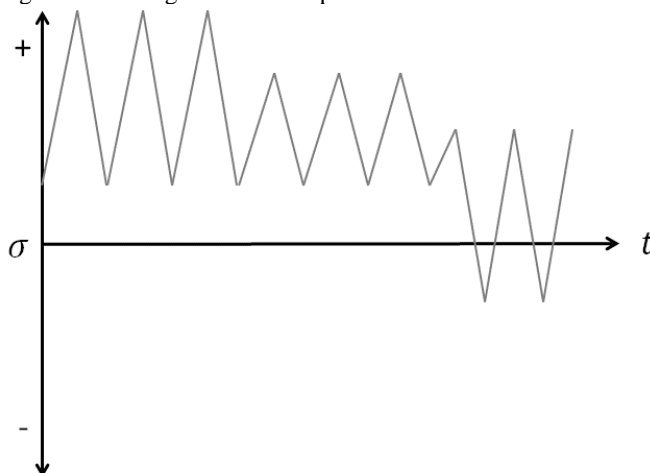
Neste casos é necessário transformar a solicitação irregular em uma solicitação equivalente, para tanto são usados métodos como o metodo *rainflow*.

Os carregamentos de amplitude irregular podem ser classificados em carregamento de amplitude variável e carregamento de amplitude aleatória.

2.2.2.2.1 Carregamentos de amplitude variável.

Este tipo de carregamento nada mais é do que blocos de carregamentos de ciclos regulares, variando apenas a amplitude de tensão por determinados períodos de tempo, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Carregamento de amplitude variável.

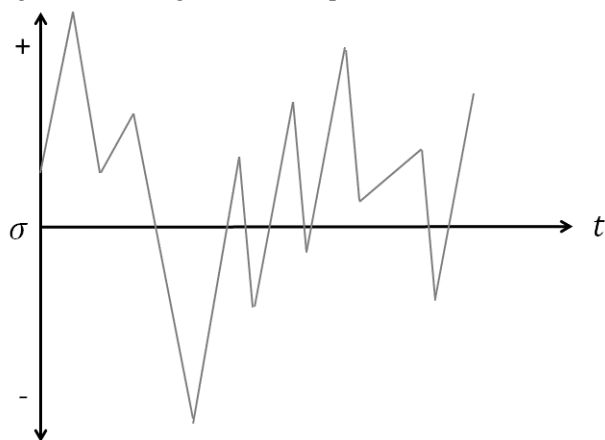


A contribuição de cada um destes carregamentos constantes para a falha do material pode ser calculada através da teoria de danos cumulativos, desenvolvida por Miner e denominada regra do dano linear.

2.2.2.2.2 Carregamentos de amplitude aleatória

Este tipo de carregamento é totalmente aleatório normalmente sendo aquisitado diretamente na aplicação do componente a ser estudado como, por exemplo, a suspensão de um carro, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Carregamento de amplitude aleatória.



2.2.3 Seleção do Modelo de fadiga.

Segundo Norton (2000), o fenômeno de fadiga pode ser caracterizado por três modelos comumente usados, o modelo tensão versus número de ciclos, o modelo deformação versus número de ciclos e o modelo da mecânica da fratura usado para predição ou estudo do crescimento de trincas, sendo, portanto, um complemento dos dois primeiros.

A definição da fronteira entre a fadiga de alto ou baixo ciclo varia de material para material e é dada, segundo Rosa (2002), pela relação de Coffin-Manson, que é expressa através das equações 6 e 7.

$$\Delta \varepsilon_p = M N_f^c \quad (6)$$

$$\Delta \varepsilon_e = B N_f^b \quad (7)$$

Sendo:

N_f = número de ciclos para a falha;

M, c, B e b = constantes do material;

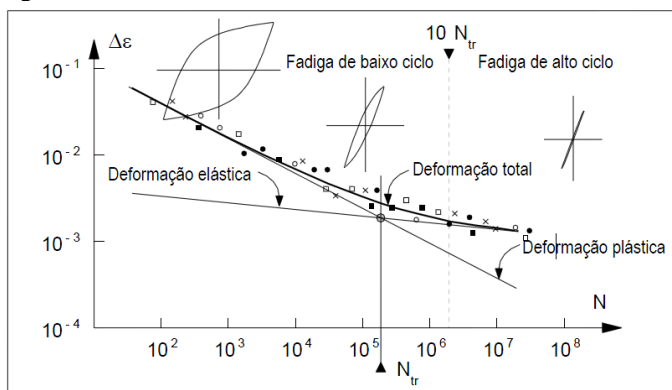
$\Delta \varepsilon_p$ = Parcela de deformação plástica;

$\Delta \varepsilon_e$ = Parcela de deformação elástica.

As Equações 6 e 7 são retas em coordenadas logarítmicas, como mostrado através da Figura 11, onde M é a deformação plástica necessária para levar o material a falha em um ciclo, $N_f = 1$. A região em que há predominância das deformações plásticas é usualmente referida como fadiga de baixo ciclo, onde existe a presença de deformações plástica cíclicas, em nível macroscópico, como evidenciado pelo laço de histerese.

Dependendo da resistência do material e da sua ductilidade, o limite superior de ciclos para a região de baixo ciclo pode variar de 10^1 a 10^5 ciclos aproximadamente. Para materiais dúcteis usuais, o regime de baixos ciclos é limitado a aproximadamente 50.000 ciclos.

Figura 11 – Limite em baixo em alto ciclo



Fonte: Adaptado de Rosa (2002).

O ponto em que $\Delta \varepsilon_e = \Delta \varepsilon_p$, Figura 11, é denominado de ponto de transição, definindo o número de ciclos de transição, N_{tr} que é definido pela equação 8.

$$N_{tr} = \left(\frac{B}{M}\right)^{1/(c-b)} \quad (8)$$

Este ponto separa a região em que ocorre predominância de $\Delta\varepsilon_p$, da região na qual predomina $\Delta\varepsilon_e$. De uma forma geral, com $N < 10N_{tr}$ a deformação plástica é importante e nesta região é definido o regime de fadiga a baixo ciclo. No caso de $N > 10N_{tr}$ a deformação plástica existe ainda, mas não é tão importante e agora é definido o regime de fadiga de alto de ciclo. Assim o limite superior para a fadiga a baixos ciclos fica definido pela relação entre a deformação elástica e a deformação plástica, ou, o que é equivalente, pela geometria do laço de histerese.

Para alguns materiais o valor de N_{tr} pode ser elevado, da ordem de 10.000 ciclos, enquanto que em um material frágil N é bastante pequeno, atingindo valores tão baixos como 6. O que se observa é que, em geral, altos valores de ductilidade e baixa tensão limite de resistência resultam em valores elevados para N_{tr} . Inversamente, uma alta resistência e baixa ductilidade resultam em um baixo valor de N_{tr} .

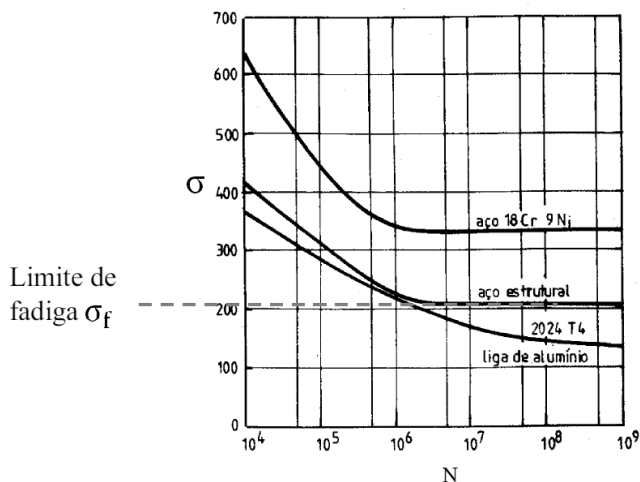
2.2.3.1 O modelo tensão versus número de ciclos

Também conhecido como modelo de alto ciclo ou modelo de Wohler ele é o mais antigo e o mais aplicado dos três, sendo usado quando se espera que o sistema tenha uma vida superior à 10^3 ciclos e quando as cargas envolvidas não ultrapassam o limite elástico do material, ou seja, não existam deformações plásticas.

Ele é baseado em tensões e busca definir a tensão de resistência à fadiga ou tensão limite de fadiga, limite este que não existe para todos os materiais.

Porém, quando ele existe é possível que o componente seja projetado para que as tensões cíclicas exercidas fiquem sempre abaixo deste valor gerando um projeto denominado “projeto para vida infinita”. Uma curva típica de fadiga de alto ciclo é ilustrada na Figura 12.

Figura 12 – Típica curva de alto ciclo para vários tipos de aço.



Fonte: Adaptado de Abrahão (2008).

O modelo de alto ciclo é caracterizado, segundo Rosa (2002), pelo seguinte equacionamento:

$$\sigma_n = CN^m \quad (9)$$

Sendo:

N = número de ciclos;

$$m = -\frac{1}{3} \log \frac{\sigma_n}{\sigma_f}; \quad (10)$$

$$C = \sigma_n N^{-m}; \quad (11)$$

σ_n = tensão alternante para 10^3 ciclos

σ_f = tensão alternante para 10^6 ciclos, ou tensão limite de fadiga.

A Equação 8 pode ser alterada em função do número de ciclos possibilitando assim encontrar o número de ciclos para um determinado valor de tensão, conforme a Equação 12 descrita abaixo.

$$N = \left(\frac{\sigma_c}{C} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (12)$$

Sendo:

σ_c = tensão atuante no componente.

2.2.3.2 O modelo deformação-número de ciclos

Também conhecido como modelo de baixo ciclo é aplicado quando se espera uma vida inferior a 10^3 ciclos e quando as tensões cíclicas trabalham dentro do regime plástico do material, causando, portanto, deformações plásticas no componente.

Como é um modelo baseado em deformação fornece uma visão bem melhor do estágio de iniciação da trinca já que envolve escoamento do material.

Segundo Rosa (2002), quando o material fica solicitado ciclicamente dentro da região plástica as deformações são mais significativas para qualificar o material do que as tensões.

O equacionamento mais comum aplicado a este modelo é a denominada equação de Coffin-Manson, descrita abaixo pela equação 13.

$$\Delta \varepsilon = B N_f^b + M N_f^c \quad (13)$$

Quando os valores destas constantes não estão disponíveis na literatura existem métodos, tais como o das inclinações universais proposto pelo próprio Manson que atribuem valores padronizados para estes parâmetros com o intuito de se obter uma primeira estimativa da vida do componente.

2.2.3.3 Mecânica da fratura

A mecânica da fratura modela a fase de propagação da trinca sendo usada em conjunto com o modelo de deformação-número. Essa metodologia é amplamente utilizada pela indústria aeronáutica para programas de manutenção preventiva onde se consegue prever o estado ou tempo restante de vida de determinado componente baseado no tamanho e condições da trinca.

Segundo Colim (2006), a fratura é definida como a separação do sólido em duas ou mais partes, podendo ser dúctil ou frágil.

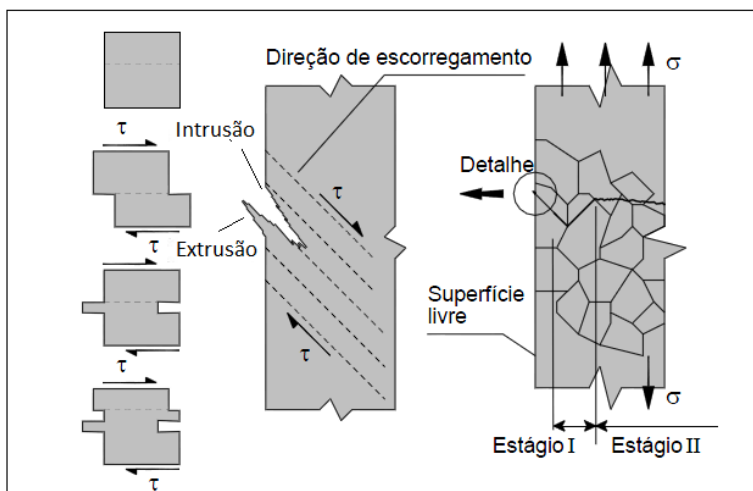
Pode-se dividir o processo de fratura por fadiga em três fases: nucleação, propagação e ruptura.

Uma fratura dúctil é caracterizada por uma apreciável deformação plástica na nucleação e na propagação da trinca. Uma fratura frágil nos metais é caracterizada por uma grande velocidade de propagação da trinca, com pequena deformação plástica, mesmo em um nível microscópico.

Uma característica importante é que a geração e a propagação da trinca não provocam mudanças evidentes no comportamento da estrutura, em geral não há avisos prévios da falha iminente e a fratura final da peça é súbita, com consequências possivelmente catastróficas.

Segundo Rosa (2002), a falha por fadiga está ligada a deformações plásticas e, estas, associadas com tensões cisalhantes, vários mecânicos podem desencadear esta deformação que depende da estrutura do material, dentre eles, o movimento de discordâncias em materiais de estrutura cristalina ou a formação de planos de deslizamento em materiais dúcteis; a Figura 13 ilustra este mecanismo.

Figura 13 – Planos de deslizamento e estágio de propagação da trinca.



Fonte: Adaptado de Rosa (2002).

Segundo Rosa (2002), nesta fase os deslizamentos cíclicos ocasionam na superfície da peça reentrâncias no formato de pequenas fendas superficiais, chamadas intrusões, e formam também saliências de forma irregular, chamadas extrusões.

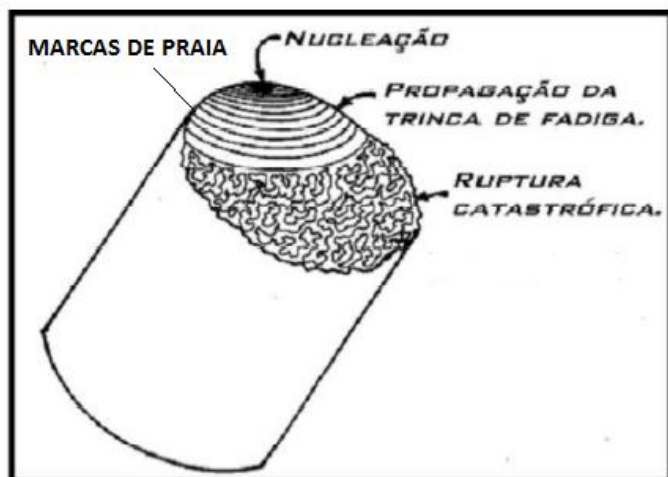
A Figura 13 mostra a sequência de movimentos de deslizamento responsáveis pela formação de uma intrusão e de uma extrusão.

Tais formações provocam concentrações de tensão na região afetada que em seguida se convertem em micro trincas, este estágio é definido na Figura 13 como estágio I.

No estágio I a trinca se propaga de acordo com as tensões cisalhantes e seguindo o contorno dos grãos desfavoravelmente orientados.

No estágio II da Figura 13, também chamado de propagação, o crescimento da trinca depende das tensões trativas que o material está sofrendo, é nessa fase que ocorrem as chamadas marcas de praia ilustradas na Figura 14.

Figura 14 – Marcas de praia durante as fases de desenvolvimento da trinca.



Fonte: Adaptado de Souza (2011).

Muitas vezes a propagação no estágio II produz uma superfície que fica marcada macroscopicamente pelas sucessivas posições à frente da trinca dando origem as chamadas linhas de praia. (ROSA, Mecânica da fratura e fadiga, 2002).

Por fim acontece a ruptura do material de maneira brusca caracterizando a fadiga do material.

Segundo Schijve (2003), a trinca incisasse em um escala microscópica, seguida pelo seu crescimento em uma escala macroscópica

e por fim acontece falha do componente no último ciclo de sua vida em fadiga.

2.2.4 Adequação da curva do material ao componente

A curva de fadiga disponível para vários materiais na literatura é obtida através de testes com corpos de prova padronizados, que normalmente são bem diferentes do componente que está sendo estudadas, estas diferenças são denominados fatores de correção, pois alteram a curva e os valores de resistência a fadiga do componente em relação à curva do material e devem, portanto ser considerados.

Segundo Rosa (2002), se pode tratar estes os fatores de correção de duas maneiras distintas: a primeira é utiliza-los como fatores de redução da resistência a fadiga do material e a segunda é utiliza-los como intensificadores de carga, condição esta, que fica restrita ao fator de concentração de tensão, que pode ser utilizado tanto para reduzir à resistência a fadiga do material, quanto para intensificar o valor de tensão usado como referência para o cálculo de fadiga.

2.2.4.1 O efeito da tensão média

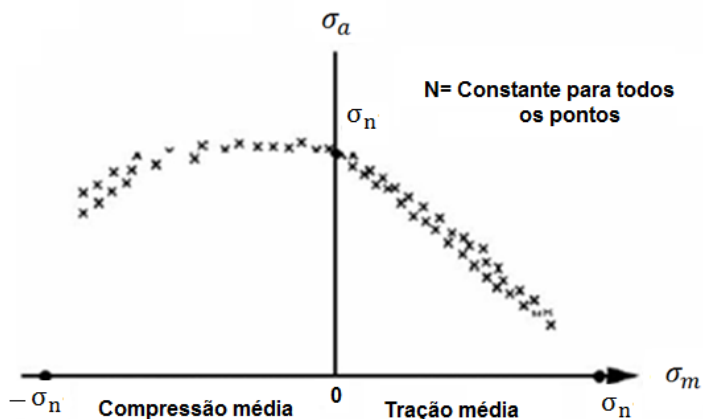
Segundo Manson (2006), a tensão média pode ter um efeito extremamente prejudicial a determinação da vida em fadiga de um componente, pois em alguns casos sua presença não é clara como, por exemplo, no caso de tensões residuais.

A tensão média tem uma enorme influência na vida em fadiga, componentes submetidos a ciclos com tensão média diferente de zero como mostrado nos ciclos variado e repetido precisam ter sua curva de fadiga corrigida.

No caso de tensões tratativas o componente tende a romper antes do previsto, pois a tensão tende a abrir trincas, no caso de tensões compressivas o desempenho do componente tende a melhorar, pois a tensão tende a fechar ou impedir a propagação de trincas.

A Figura 15 mostra este comportamento, comparando os valores de N em compressão e tração em relação às de tensões alternadas e médias.

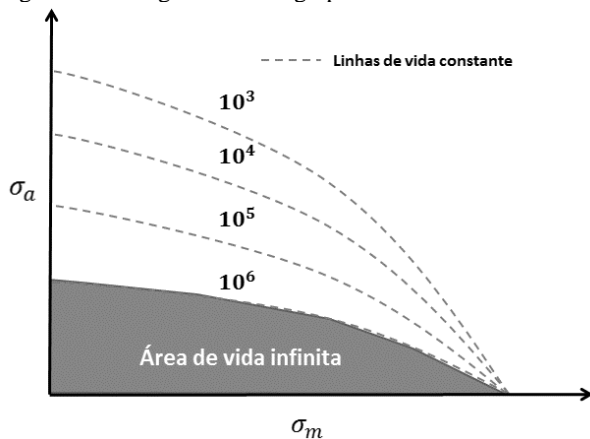
Figura 15 – O efeito da tensão média.



Fonte: Adaptado de Lemos (2005).

Este tipo de representação foi pela primeira vez proposta por Haigh e é comumente conhecida como diagrama de Haigh, ilustrado na Figura 16 com várias curvas de vida constantes.

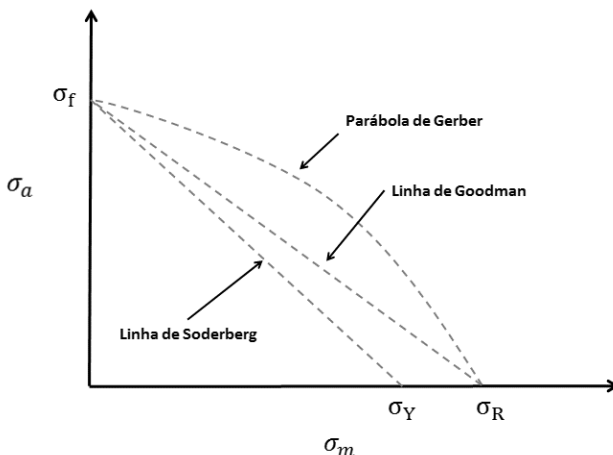
Figura 16 – Diagrama de Haigh para vidas constantes



Fonte: Adaptado de Lemos (2005).

Como a obtenção do diagrama é muito dispendiosa, vários critérios para aproximar o seu comportamento foram desenvolvidos, dentre estes critérios estão os critérios de Gerber, Goodman e Soderberg, ilustrados na Figura 17.

Figura 17 – Critérios de fadiga.



2.2.4.1.1 A Parábola de Gerber

A parábola de Gerber liga por uma parábola a tensão limite de fadiga (σ_f) e a tensão de ruptura (σ_R) e é dada pela equação abaixo:

$$\sigma_a = \sigma_f (1 - (\sigma_m / \sigma_R)^2) \quad (14)$$

2.2.4.1.2 A Reta de Goodman

A reta de Goodman liga com uma reta o limite de fadiga e a tensão de ruptura e é dada pela equação abaixo:

$$\sigma_a = \sigma_f (1 - (\sigma_m / \sigma_R)) \quad (15)$$

2.2.4.1.3 A Reta de Soderberg

A reta de Soderberg liga com uma reta a tensão limite de fadiga e a tensão limite de escoamento (σ_Y) sendo considerado o critério mais seguro, pois evita a ocorrência de deformação plástica, podendo ser escrito conforme a equação abaixo:

$$\sigma_a = \sigma_f((1 - (\sigma_m / \sigma_Y)) \quad (16)$$

2.2.4.2 Fatores modificadores

Os fatores modificadores são as diferenças entre as condições de obtenção da curva de fadiga do material e as condições apresentadas no ciclo de trabalho do componente, entre elas estão, solicitação, tamanho, acabamento superficial, temperatura, ambiente de trabalho, entre outros.

De maneira geral qualquer diferença entre a condição de obtenção da curva do material e a aplicação no componente altera a curva de fadiga do mesmo e exige uma correção, porém, estes fatores são obtidos empiricamente e não estão disponíveis para todos os materiais ou condições de aplicação além de terem influências diferentes para os modelos de alto e baixo ciclo.

A correção da curva, ou seja, a obtenção da curva do componente é feita, segundo Rosa (2002), aplicando-se a equação 17 que multiplica os fatores de correção (que para a curva do material são considerados unitários e para o componente são valores abaixo da unidade) pelo valor de σ_f , que passa a ser definido como σ'_f .

A Equação 17 é descrita abaixo:

$$\sigma'_f = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \dots k_i \cdot \sigma_f \quad (17)$$

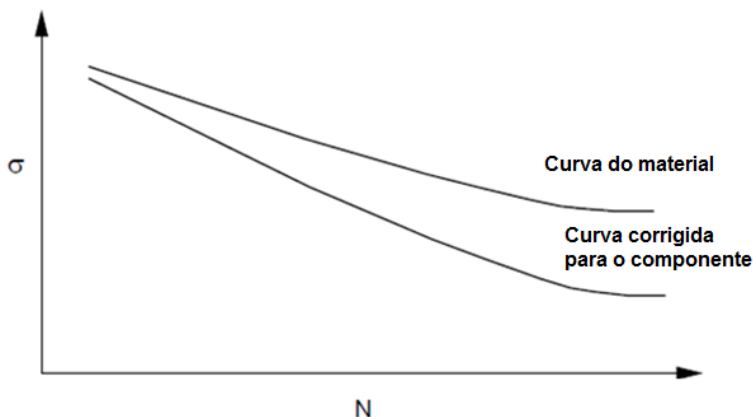
Sendo:

σ'_f = tensão limite de fadiga corrigida;

k_i = iésimo fator de correção.

Uma ilustração dessa correção aplicada a uma curva de alto ciclo é feita na Figura 18.

Figura 18 – Curva de alto ciclo do material e a corrigida para o componente.



Fonte: Adaptado de Rosa (2002).

2.2.4.3 Fator de concentração de tensão

Segundo Balazs (1965), a maioria das falhas em componentes poliméricos acontece devido a regiões de concentração de tensão. Para avaliar como essa concentração age sobre a vida em fadiga do componente utiliza-se, segundo Rosa (2002), um fator de concentração de tensão em fadiga denominado k_n , derivado do valor de k_t , utilizado para avaliar a concentração de tensão em carregamentos estáticos, o valor de k_n é dado por:

$$K_n = \frac{\sigma_{fse}}{\sigma_{fce}} \quad (18)$$

Sendo:

σ_{fse} = Tensão limite de fadiga sem entalhe;

σ_{fce} = Tensão limite de fadiga com entalhe.

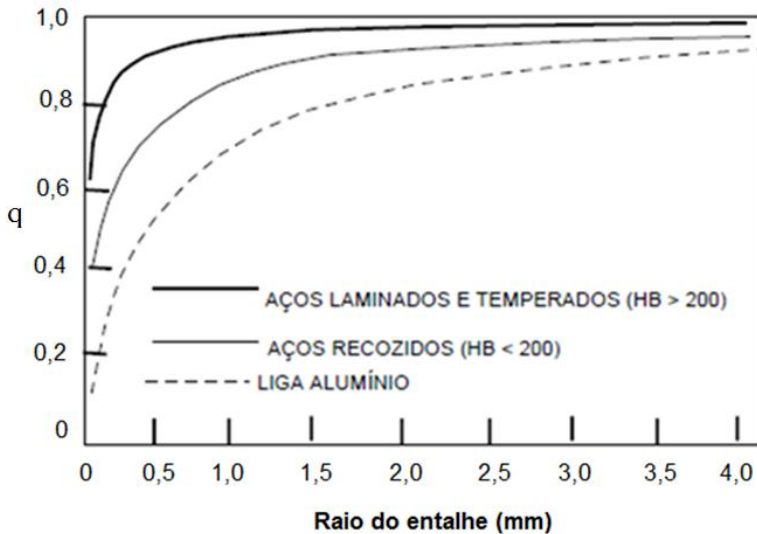
Segundo Rosa (2002) a análise do efeito de concentração de tensão em fadiga pode ser feita de duas maneiras distintas: a primeira analisando o efeito para vidas infinitas usando a tensão limite de fadiga, σ_f e a segunda para vidas finitas usando as curvas de alto ou baixo ciclo.

Para uma análise de vida infinita k_n passa a ser chamado de k_f e pode ser definido como:

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad (19)$$

Onde q é denominado fator de sensibilidade ao entalhe e pode ser obtido através de ensaios experimentais, sendo função da resistência do material e do raio do entalhe, sendo comumente apresentado em um gráfico similar ao ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Fator de sensibilidade ao entalhe.



Fonte: Adaptado de Rosa (2002)

É possível obtê-lo também analiticamente através da equação 20.

$$q = \frac{(k_f - 1)}{(k_t - 1)} \quad (20)$$

Rosa (2002) sugere que inversamente a abordagem habitual onde k_f é usado similarmente aos fatores k_1 , k_2 , k_3 como fator de redução da resistência da peça, que ele seja agora usado como fator intensificador de tensões, aumentando o valor de solicitação sobre o componente.

Esta abordagem se faz vantajosa devido a facilidade em avaliar tensões residuais e cargas combinadas atuando diretamente na solicitação

no ponto crítico e não em sua resistência como normalmente é encontrado na literatura.

2.2.4.3.1 Concentração de tensão no regime elasto-plástico

Dentro do regime elasto-plástico a análise da influência da concentração de tensões torna-se mais complexa que no caso elástico devido a não linearidade do material.

Neuber desenvolveu uma solução analítica relativamente simples para o problema denominada regra de Neuber, que, independe da curva tensão-deformação do material e é descrita analiticamente a seguir pela equação 21:

$$k_{\sigma} \cdot k_{\varepsilon} = k_t^2 \quad (21)$$

Sendo:

k_{σ} = Fator de concentração de tensão inicial;

k_{ε} = Fator de concentração de deformação inicial.

A condição de igualdade pode ser verificada pelas seguintes equações:

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \leq k_t \quad (22)$$

$$k_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_0} \geq k_t \quad (23)$$

Segundo Rosa (2002), a solução do problema é desenvolvida pela substituição das definições de k_{σ} e k_{ε} na equação 21, separando as variáveis que são conhecidas das que são incógnitas e considerando que k_t sempre é conhecido para a geometria, resultando assim nas seguintes equações:

Problema direto:

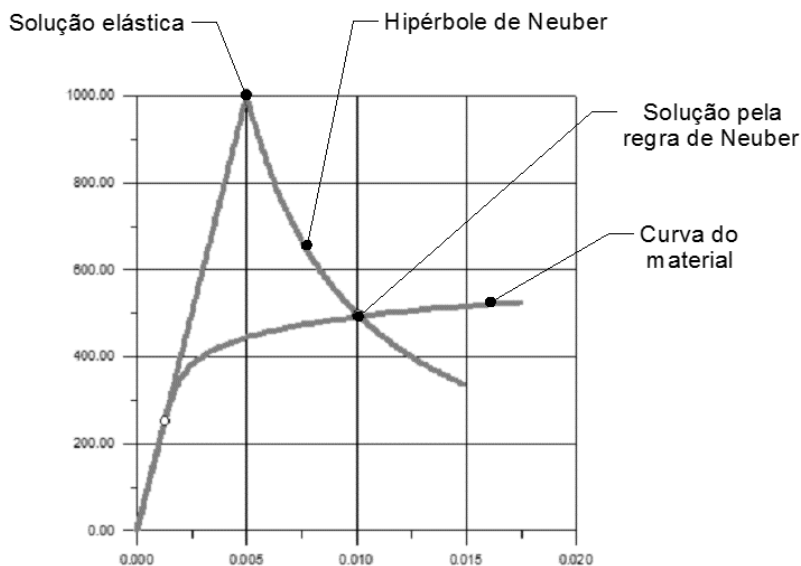
$$\sigma_{\max} \cdot \varepsilon_{\max} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot k_t^2 \quad (24)$$

Problema inverso:

$$\sigma_0 \cdot \varepsilon_0 = \frac{\sigma_{\max} \cdot \varepsilon_{\max}}{k_t^2} \quad (25)$$

Para os dois casos a aplicação da regra de Neuber fornece uma equação do tipo $\sigma \cdot \varepsilon = \text{constante}$, o que corresponde a uma hipérbole no plano tensão versus deformação, denominada hipérbole de Neuber, ilustrada na Figura 20.

Figura 20 – Hipérbole de Neuber.



Fonte: Adaptado de Rosa (2002).

A solução do problema é mostrada na Figura 20 e é o ponto de interseção da hipérbole de Neuber com a curva tensão-deformação do material, ela pode ser obtida tanto graficamente, como mostrado anteriormente quanto de forma analítica, quando é usado um modelo matemático da curva tensão-deformação.

3 POLÍMEROS

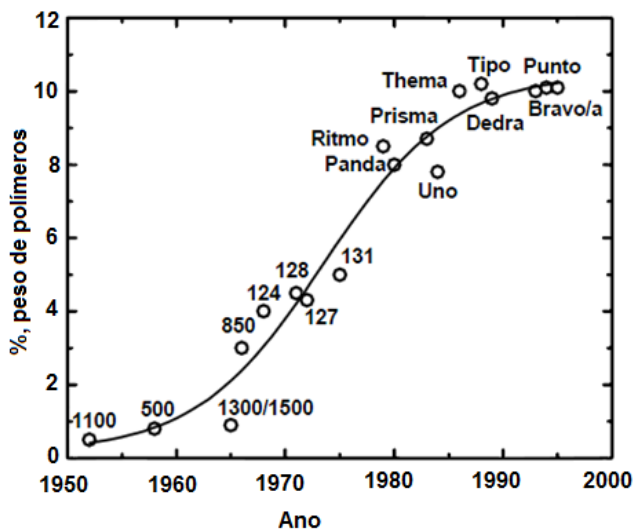
Segundo Canavarolo (2010), a palavra polímero se origina de duas palavras gregas, *poli* que significa muitas e *mero* que significa partes, ou seja, polímero significa muitas partes ou, em outras palavras a repetição de muitas unidades de um mesmo tipo de composto químico.

Segundo Olivier (2007), os polímeros são formados por grandes moléculas denominadas macromoléculas nas quais os átomos são unidos por ligações covalentes.

Atualmente os polímeros vêm sendo amplamente aplicados em diversas áreas em substituição aos materiais tradicionais como aço e alumínio, principalmente devido a sua baixa densidade e flexibilidade de fabricação, o que se traduz na indústria automotiva, por exemplo, como redução de massa e custo no veículo.

Segundo Filho (2002), desde 1960 o uso de polímeros nos automóveis americanos aumentou de aproximadamente 12 para 100 kg por veículo, crescimento este que é mais significativo se considerarmos a diminuição da massa e do tamanho dos veículos ocorrida neste período. A Figura 21 mostra o crescimento do uso de polímeros em alguns veículos ao longo dos anos.

Figura 21 – Crescimento da aplicação de polímeros em alguns veículos.



Fonte: Adaptado de Filho (2002)

3.1 CLASSIFICAÇÕES DOS POLÍMEROS

Os polímeros podem ser classificados de várias maneiras, dentre elas, pela ocorrência (se são naturais ou sintéticos), de acordo com a estrutura molecular, de acordo com a configuração molecular, pelo comportamento mecânico e térmico, por suas aplicações, ou pelo grau de organização molecular.

Ao escopo deste estudo é relevante o aprofundamento da classificação em função do comportamento mecânico e térmico.

3.1.1 Classificação em função do comportamento mecânico e térmico

Os polímeros podem ser divididos em relação ao seu comportamento mecânico e térmico em três grandes grupos: os termoplásticos, os termorrígidos e os elastômeros.

3.1.1.1 Termoplásticos

Constituem a maior parte dos polímeros existentes, podendo ser conformados em formas que são mantidas após seu resfriamento, podem também ser reciclados seguidas vezes e solubilizados por vários solventes.

Sua ruptura acontece na maioria das vezes apresentando deformações plásticas bastante acentuadas.

Dependendo de sua estrutura, à temperatura ambiente os termoplásticos podem ser maleáveis, rígidos ou frágeis, como exemplo desta classe de polímeros temos o *polietileno (PE)*, usado em sacos plásticos e sacolas.

3.1.1.2 Termorrígidos

Também são conhecidos como termofixos ou termoendurecíveis, justamente pela incapacidade de serem remodelados, isso acontece devido à sua estrutura intermolecular estreitamente encadeada em todas as direções, o que os torna extremamente estáveis a variações de temperatura.

Suas ligações intermoleculares são produzidas a partir de um pré-polímero ou resina de base que ser ao aquecido, geralmente amolece, podendo ser moldado, porém, ao se continuar o aquecimento iniciam-se as reações de cura, que tornam o polímero cada vez mais rígido, formando

complexos irreversíveis que impedem que o material possa ser novamente moldado.

Sua ruptura geralmente é frágil, ou seja, há pouca ou nenhuma deformação visível antes do rompimento.

Um exemplo desta classe de polímeros é o *baquelite*, usado em tomadas elétricas e cabos de panela.

3.1.1.3 Elastômeros

A diferença básica entre os elastômeros e os plásticos (sejam termofixos ou termoplásticos), é que nos elastômeros o campo de deformação elástica é muito maior, eles possuem uma razão deformação elástica/tensão muito grande, ou seja, pequenas tensões produzem grandes deformações.

Os elastômeros podem ser termofixos ou termoplásticos, semelhantemente aos “plásticos”, os termofixos não são fusíveis nem solúveis, justamente por sua estrutura apresentar ligações entre as macromoléculas, já os termoplásticos, são copolímeros em bloco, onde um bloco é de material flexível e outro de material rígido à temperatura ambiente.

Durante a aplicação de carga, os blocos flexíveis das cadeias poliméricas permitem uma grande deformação (comparada aos materiais rígidos), e os blocos rígidos fornecem a propriedade elástica da deformação, pois não permitem o deslizamento permanente das cadeias.

3.1.2 Comportamento mecânico dos polímeros.

O comportamento mecânico dos polímeros é bem mais instável que os aços e tal instabilidade provoca restrições de aplicação e dificuldade de dimensionamento, pois a complexidade na previsão das respostas as solicitações aplicadas é muito maior do que a encontrada com os projetos de componentes em aço.

As propriedades mecânicas dos polímeros são caracterizadas pelo modo como estes materiais respondem as solicitações mecânicas aplicadas, podendo estas ser do tipo tensão ou deformação. A natureza desta resposta depende da estrutura química, temperatura, tempo e da história (condições) de processamento do polímero.
(Canevarolo, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**, 2010.)

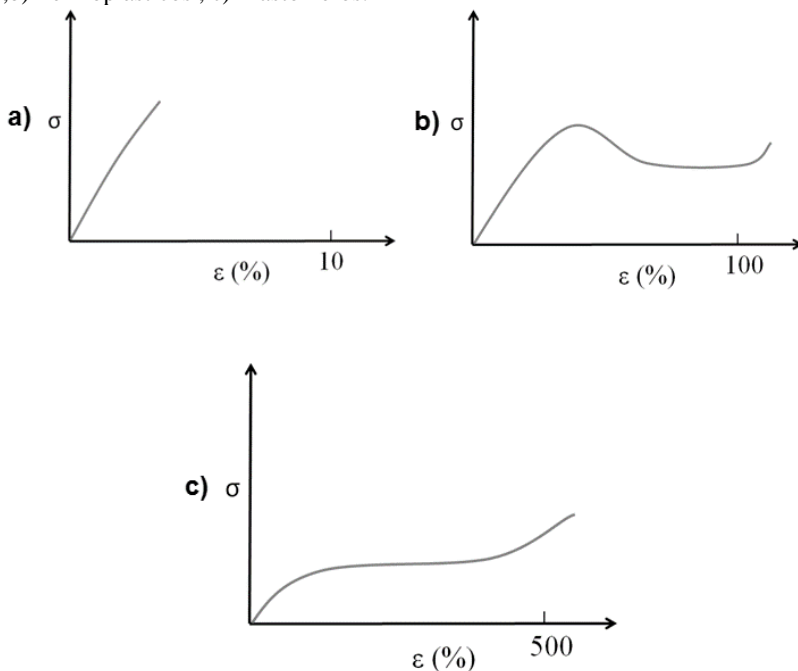
Os polímeros apresentam uma resposta viscoelástica às solicitações aplicadas, ou seja, sua curva tensão deformação tem uma parcela elástica, como um sólido hookeano e uma parcela viscosa, como um líquido newtoniano.

Segundo Stuart (2003), este comportamento é associado com a distorção das cadeias do polímero e devido a isso o tempo de duração da solicitação é muito importante, pois está diretamente relacionado ao tempo que o polímero tem para responder.

3.1.2.1 Relações tensão deformação dos polímeros.

A Figura 22 ilustra as curvas de tensão-deformação típica dos termoplásticos, termorrígidos e elastômeros.

Figura 22 – Curvas de tensão versus deformação dos polímeros: a) Termorrígidos ,b) Termoplásticos , c) Elastômeros.



Fonte: Adaptado de Oliver (2007).

Através da Figura 22(a) é possível observar que os termorrígidos têm uma ruptura frágil quase sem nenhum escoamento.

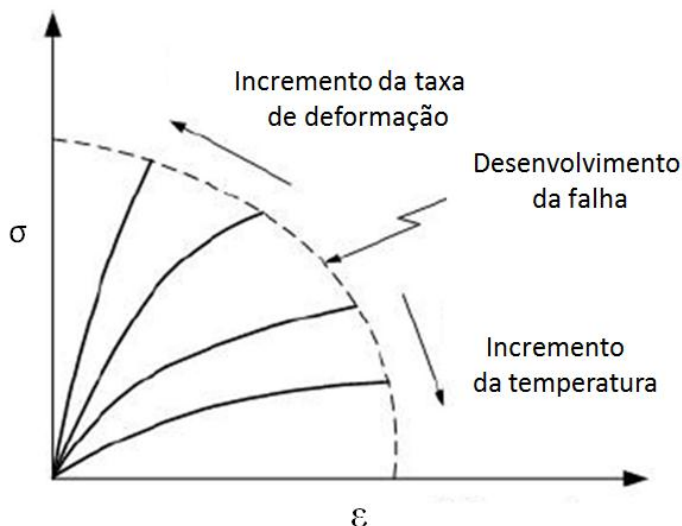
Já os termoplásticos ilustrados na Figura 22(b) sofrem grandes deformações antes da ruptura podendo chegar a 700% em alguns casos, formando uma zona de estrição, aonde a seção sob tensão é reduzida uniformemente até a ruptura final.

Em relação aos elastômeros ilustrados na Figura 22(c), existem grandes deformações sem a formação da característica zona de estrição dos termoplásticos.

Devido a grande sensibilidade dos polímeros em relação à temperatura e a taxa de deformação (velocidade de aplicação da carga) a curva tensão deformação pode variar muito com a alteração desses parâmetros, principalmente nos termoplásticos, passando de um comportamento vítreo a um comportamento viscoso.

Segundo Balazs (1965), o aumento da temperatura do polímero permite que as cadeias moleculares se movimentem com maior liberdade causando alterações em suas propriedades mecânicas. A Figura 23 ilustra estas alterações.

Figura 23 – Variação na curva tensão & deformação de polímeros



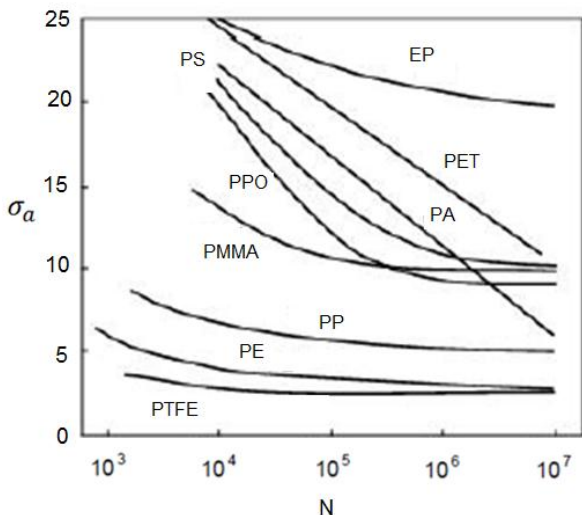
Fonte: Adaptado de Oliver (2007).

3.1.3 Comportamento em fadiga dos polímeros.

A falha de um material polimérico devido ao fenômeno de fadiga acontece devido à aplicação de tensões cíclicas com valores abaixo dos requeridos para causar escoamento ou fratura quando a tensão aplicada aumenta continuamente. O efeito destas tensões cíclicas origina a iniciação de trincas microscópicas em centros de concentração de tensões ou sobre a superfície e subsequentemente a propagação desta trinca levando a uma eventual falha do material. “Nos polímeros de uso estrutural, a falha pode ser definida não só em termos de fratura, mas também devido a perda de rigidez” (Oliver, **Análise de falha da camada polimérica externa de cabos umbilicais**, 2007)

Segundo Stuart (2003), fadiga é uma forma de falha que pode ocorrer quando um polímero é submetido a cargas cíclicas e assim como os aços eles possuem uma tensão limite de fadiga, que é geralmente de 20 a 40% da sua resistência a tração estática, algumas destas curvas são ilustradas na Figura 24.

Figura 24 – Curvas de fadiga de vários tipos de polímeros.



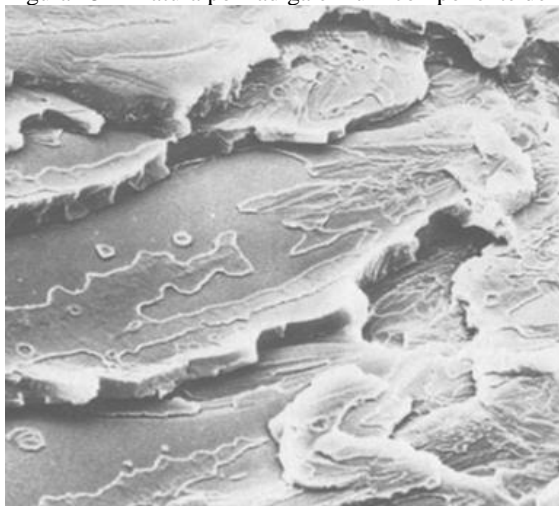
Fonte: Adaptado de Oliver (2007).

Segundo Cheremisinoff (2001), a falha por fadiga em polímeros acontece por dois mecanismos distintos dependendo da frequência do ciclo de carga, um mecânico e outro térmico.

O mecanismo mecânico, similarmente aos aços, envolve a nucleação e propagação de uma trinca, resultando em uma ruptura, este mecanismo geralmente atua em vidas de alto ciclo e é descrito como a resposta verdadeira do material a fadiga.

O mecanismo térmico acontece com tensões e frequências de aplicação de carga maiores, neste caso, pela baixa condutividade térmica e alto amortecimento interno de tensões apresentado pela maioria dos polímeros eles não conseguem dissipar o calor gerado pelos constantes ciclos de carga, resultando em um aumento em sua temperatura interna. Esse aumento de temperatura afeta suas propriedades mecânicas e leva a uma fratura prematura, geralmente dútil ou a uma excessiva deformação plástica, levando o material a falhar por sua baixa rigidez; a Figura 25 ilustra a fratura em um componente de *poliestireno* (PS).

Figura 25 – Fratura por fadiga em um componente de OS.

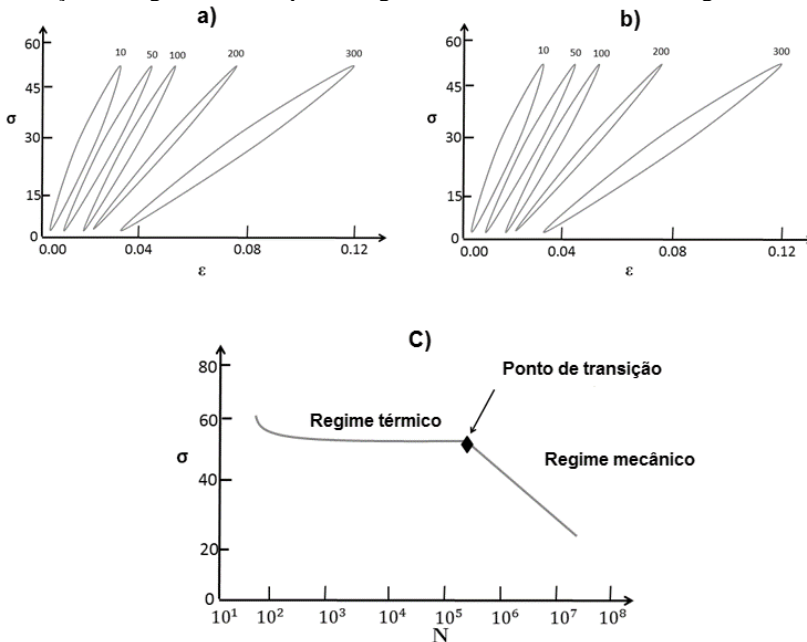


Fonte: Adaptado de Sauer (1980).

Segundo Sousa (2011), A identificação de um determinado conjunto de condições de ensaios de fadiga vai resultar na denominação do mecanismo mecânico ou térmico, ela pode ser feita pela observação da evolução dos ciclos de histerese.

A Figura 26 ilustra este fenômeno em um ensaio com o POM, onde se pode observar à brusca alteração no ângulo da curva de fadiga próximo a 10^5 ciclos (26a), região em que ocorre a transição do regime térmico para o regime mecânico e o diferente comportamento dos ciclos de histerese nos dois regimes (26b e 26c).

Figura 26 – (a) histerese no regime térmico, (b) histerese no regime mecânico, (c) transição do regime térmico para o regime mecânico na curva de fadiga.



Fonte: Adaptado de Sousa (2011)

Segundo Oliver (2007), o dano nos polímeros acontece devido a ruptura de ligações que existem entre as longas cadeias moleculares, sendo este o mecanismo que cria deformações plásticas.

A elasticidade é diretamente proporcional ao dano, em outras palavras a elasticidade diminui com o aumento do dano.

Segundo Oliver (2007), a grande diferença dos polímeros para os metais em relação à fadiga está no modo de falha devido a maior possibilidade de fadiga térmica.

A energia dissipada de pelo polímero é dada segundo Oliver (2007) pela equação 26.

$$\xi_d = \pi \cdot f \cdot M'' \cdot \varepsilon^2 \quad (26)$$

Sendo:

ξ_d = Energia dissipada por segundo;

F = Frequência;

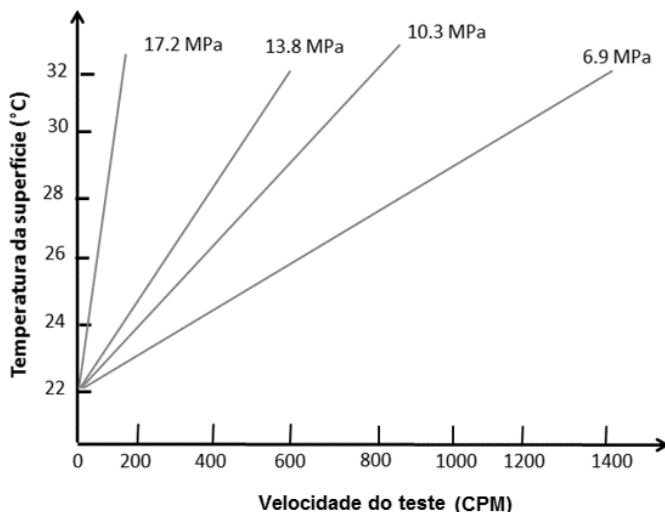
M'' = Perda de rigidez;

ε = Deformação.

Segundo Sauer (1980), vários fatores influenciam o aumento da temperatura do material entre eles a tensão média, a amplitude de tensão, a frequência do ciclo e o tipo de onda do ciclo (quadrática, senoidal, etc.).

Através da Figura 27 é possível observar este fenômeno, onde o comportamento do gradiente de temperatura do polímero, neste caso o PE, varia em função da frequência do ciclo em diferentes níveis de tensão.

Figura 27 – Temperatura do PE em função da amplitude de tensão.



Fonte: Adaptado de Sauer (1980).

Além dos parâmetros acima, segundo Cheremisinoff (2001), o aumento da temperatura depende também do tamanho do componente.

3.1.4 Mecanismo de fratura em polímeros

Existem, basicamente, dois tipos de fratura: a frágil e a dúctil. A primeira é caracterizada pela ruptura do material antes de este atingir a deformação plástica. A fratura dúctil apresenta um escoamento e uma deformação plástica antes de ocorrer à ruptura propriamente dita.

Embora a resistência do material polimérico na ruptura tenha sido bastante usada como parâmetro de controle de resistência, este valor só tem significado como parâmetro de engenharia quando o material sofre fratura frágil. No caso de fratura dúctil, a tensão onde ocorre o escoamento é mais importante, pois, além deste ponto, o material polimérico deforma-se irreversivelmente.

3.1.4.1 Mecanismo *da fratura* frágil

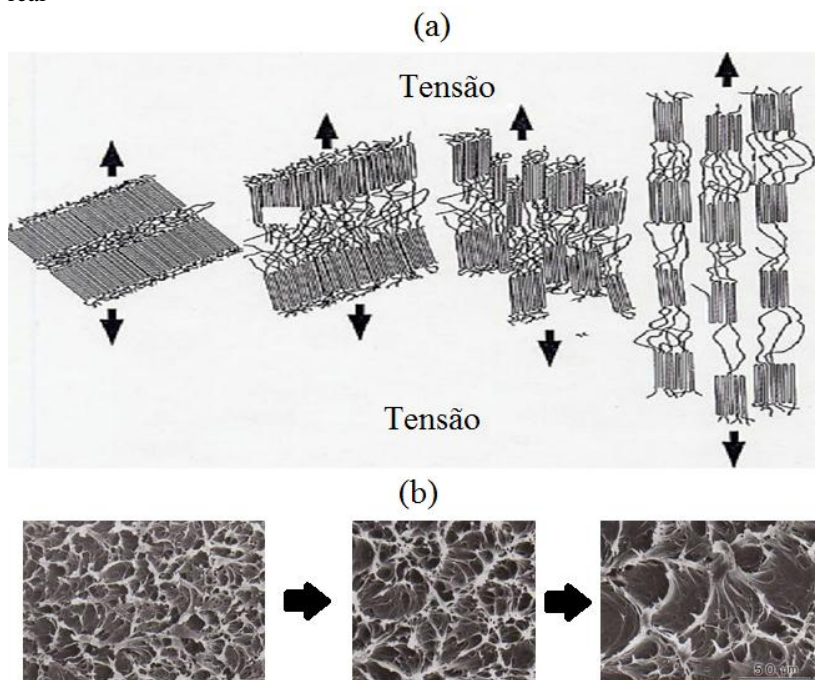
A teoria de fratura frágil para polímeros é mais fácil de ser matematicamente quantificada do que a teoria de fratura dúctil que é a mesma desenvolvida por Griffith para os aços, sendo baseada na capacidade de o material propagar uma trinca em crescimento. Esta trinca pode ser uma falha natural do material ou pode ser gerada durante a solitação mecânica.

3.1.4.2 Mecanismo *da fratura* dúctil

Os mecanismos de fratura dúctil em polímeros, embora dependam da propagação de trincas, são muito mais complexos. O processo de fratura em polímeros dúcteis ocorre em vários estágios, ou seja, o escoamento das moléculas poliméricas, o estiramento a frio das moléculas e o estágio final da fratura.

O escoamento das moléculas ocorre após atingirem níveis de deformações irreversíveis. A tensão neste estágio registra a resistência do material a deformações permanentes. Após iniciarem o escoamento, as moléculas são orientadas na direção da solitação e, ao atingirem um grau elevado de orientação, começa o processo de ruptura propriamente dito. O estágio de deformação irreversível geralmente ocorre acompanhado pelo fenômeno de “empescoamento” num ensaio de tração através da Figura 28 é possível observar este processo.

Figura 28 – (a) modelo do processo inicial de ruptura (b) processo em polímero real



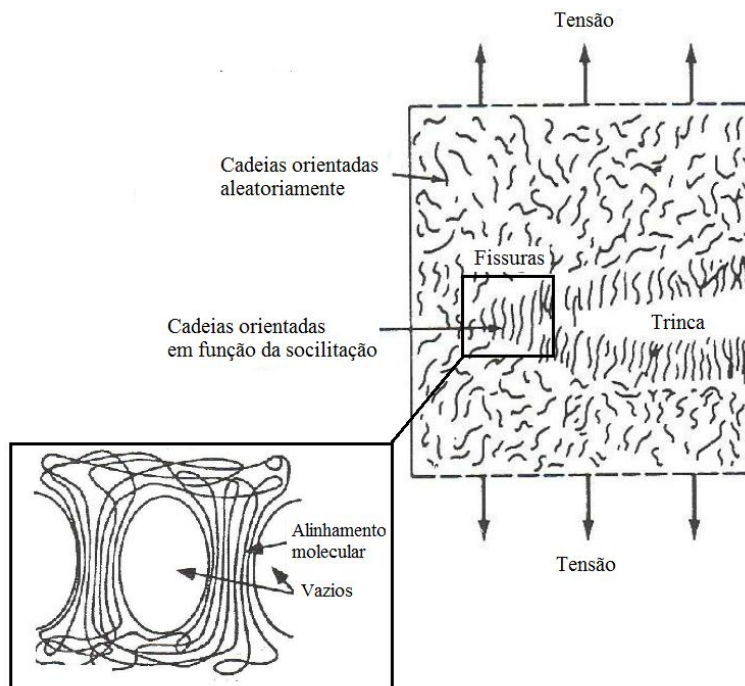
Em seguida ocorrem o fissuramento e o escoamento por bandas de cisalhamento, que são frequentemente descritos como mecanismos de deformação plástica, onde a predominância de um ou outro será dada pelas propriedades viscoelásticas do material.

A deformação por cisalhamento consiste na distorção de um formato sem alteração significativa no volume.

Já o fissuramento é a formação de microfissuras, um processo conjunto de escoamento localizado e de início de fratura. Quando um polímero vítreo é submetido à tração, pequenos buracos se formam em um plano perpendicular à tensão aplicada, produzindo uma trinca inicial. No entanto, ao invés de os buracos coalescerem para formar uma trinca verdadeira, eles são estabilizados por fibrilas de material polimérico orientado, evitando seu aumento. As microfissuras são as regiões onde ocorre interpenetração dos buracos e das fibrilas, sendo essa estrutura capaz de sustentar tensões o que distingue as fissuras das trincas.

Através da Figura 29 é possível o observar o processo completo de fratura.

Figura 29 – Processo de fratura em polímeros.



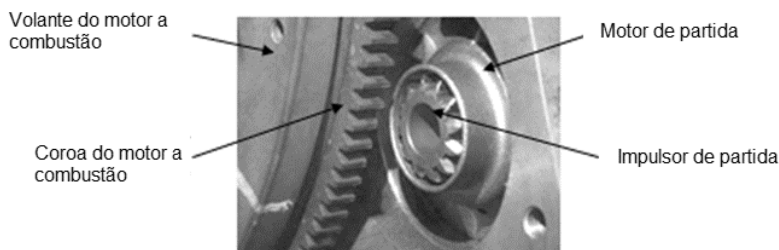
4 O SISTEMA DE PARTIDA DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA.

Todos os motores a combustão interna necessitam de um sistema que possa dar a partida nos mesmos, ou seja, fazer o virabrequim girar para que se inicie o ciclo térmico que ocorre nas câmaras de combustão.

Para tanto é necessário um torque inicial para vencer a resistência ao movimento, que existe, devido à compressão e atrito do pistão, biela, árvore de manivelas, mancais, a viscosidade do óleo e inércia do sistema.

O sistema de partida de motores a combustão mais difundido atualmente é constituído pelo motor de partida e a coroa do volante do motor a combustão, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 – Sistema de partida para motores de combustão interna.



Fonte: Adaptado de Michelotti (2008).

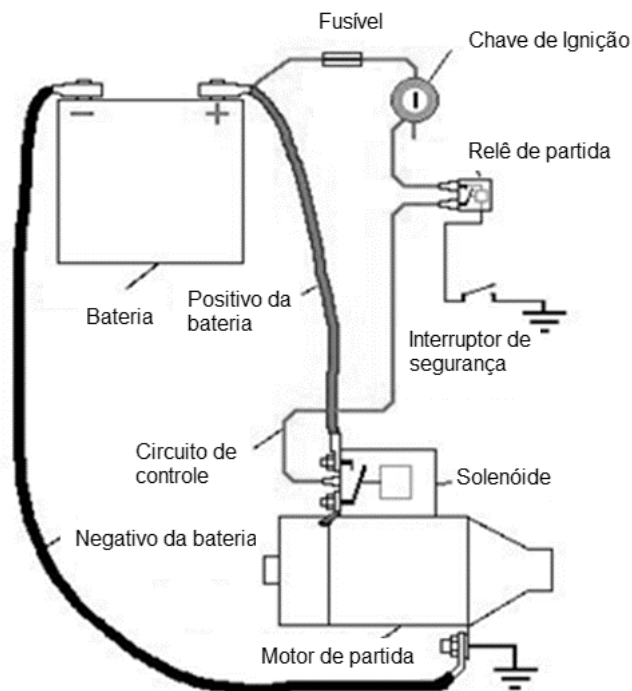
4.1 ESTRUTURA DO SISTEMA DE PARTIDA.

De acordo com Michelotti (2008), a estrutura de um sistema de partida é composta por:

- Motor de Partida (motor elétrico de corrente contínua);
- Módulos e unidades de comando (solenóide, relé, etc.);
- Bateria;
- Fiação (circuito de controle, positivo e negativo da bateria).

Esta estrutura é ilustrada na Figura 31.

Figura 31 – Estrutura de um sistema de partida.



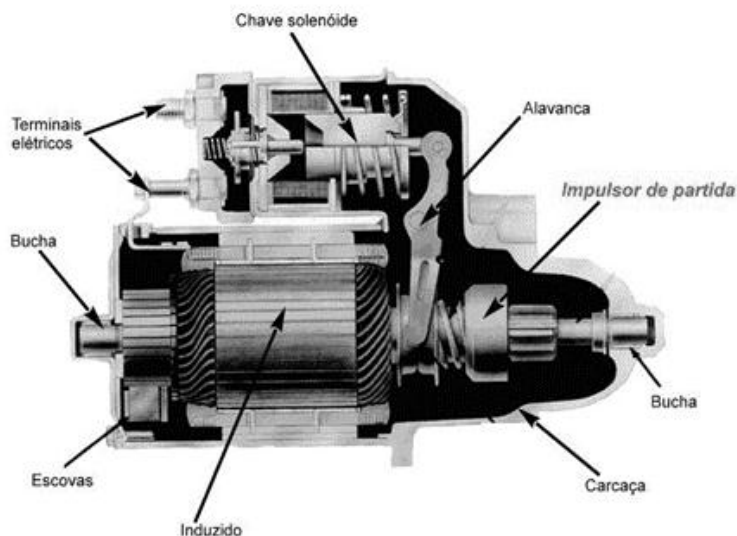
Fonte: Adaptado de Michelotti (2008).

4.1.1 O motor de partida

O motor de partida ilustrado na Figura 32 é o principal subsistema do sistema de partida e é composto pelos seguintes componentes:

- Motor elétrico;
- Subsistema de engrenamento;
- Subsistema roda-livre;
- Subsistema de transmissão.

Figura 32 – Motor de partida.



Fonte: Adaptado de Michelotti (2008).

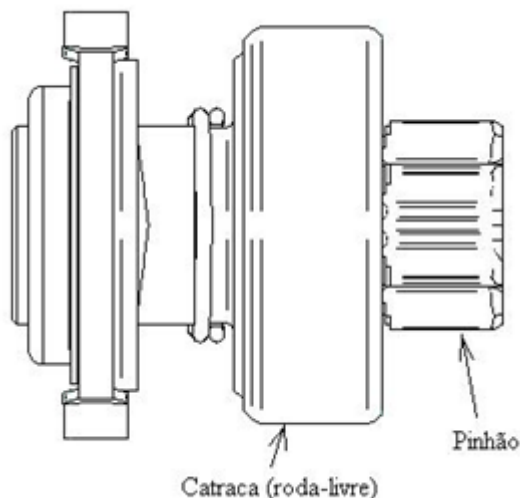
Segundo Michelotti (2008), o subsistema motor elétrico é constituído, basicamente, por uma carcaça metálica, o eixo induzido ou armadura (mancalizado entre buchas localizadas nas extremidades da carcaça), o comutador, escovas e a bobina de campo.

O subsistema de engrenamento é constituído por uma chave magnética (solenóide), uma alavanca (também chamada de “garfo”) e pelo pinhão do impulsor de partida.

O subsistema de transmissão é constituído, normalmente, por um trem de engrenagens do tipo planetário ou uma engrenagem de redução, ambos com o objetivo de aumentar a capacidade de torque transmitido pelo motor de partida.

Na parte dianteira, o eixo induzido possui um fuso de avanço com estrias helicoidais sobre o qual é montado o subsistema roda-livre, (ou catraca) e o pinhão do subsistema de engrenamento que fazem parte de um conjunto denominado impulsor de partida, mostrado em maior detalhe na Figura 33.

Figura 33 – Impulsor de partida convencional.



Fonte: Adaptado de Michelotti (2008).

A principal característica dos motores de partida é a sua potência, pois para acionar um motor de combustão de grande porte é necessária muito mais potência do motor de partida do que existe num motor de combustão de pequena cilindrada.

Segundo Michelotti (2008), o funcionamento do motor de partida acontece quando se gira a chave de ignição de um veículo dotado de motor de combustão interna para a posição de “Partida”, neste momento a potência da bateria é transferida para o circuito de controle e ativa a chave magnética (solenóide), a qual energiza o motor de partida (motor elétrico), que por sua vez, faz girar o motor de combustão.

No caso de um veículo com transmissão automática o motor de partida somente pode ser acionado quando o câmbio estiver nas posições “P” (Estacionamento, do inglês *Park*) ou “N” (Neutro, do inglês *Neutral*).

Em veículos dotados de transmissão manual eventualmente o acionamento do motor de partida também só é possível quando o pedal da embreagem está pressionado, estando fora dessa condição o interruptor de segurança permanece aberto e o relé do motor de partida desconecta o circuito de controle do sistema de partida impossibilitando a partida.

Para que a partida ocorra com sucesso o torque inicial fornecido pelo sistema de partida à coroa do motor de combustão deve ser maior do

que a resistência ao movimento que existe devido à compressão e atrito entre cada pistão e o cilindro, à viscosidade do óleo e à temperatura do motor.

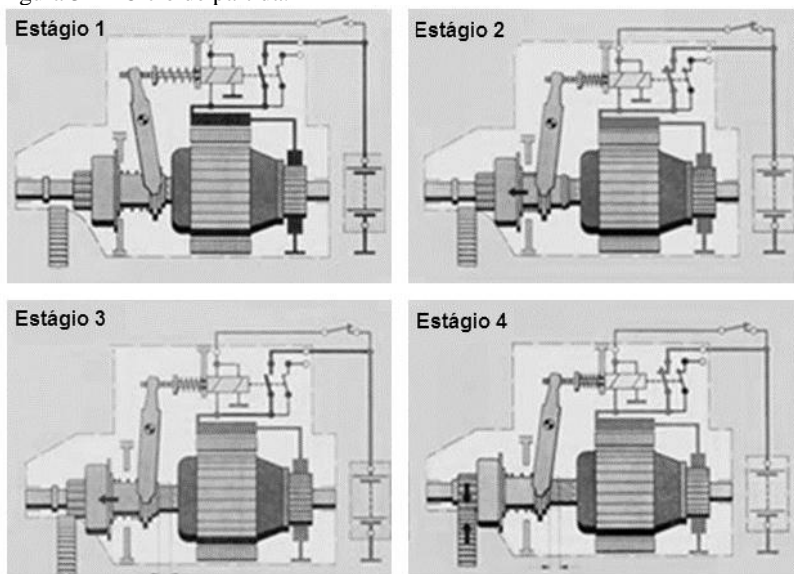
Em uma condição de baixa temperatura, uma potência maior é exigida do motor elétrico, também a potência fornecida pela bateria é menor, devido ao aumento da sua resistência interna.

Esta condição pode criar do impulsor de partida uma falha de patinamento ou *slip*, sendo assim, a condição de partida a frio torna-se a mais crítica para a qual um sistema de partida deve ser dimensionado.

O ciclo dinâmico do acionamento de um motor de combustão pelo sistema de partida (Motor de Partida/Impulsor de Partida) é bastante curto, na casa dos décimos de segundo, considerando-se o momento em que a chave de partida é acionada até o momento em que o motor a combustão inicia o funcionamento.

Para ilustrar como ocorre um ciclo comum de partida, uma divisão em quatro estágios é apresentada na Figura 34.

Figura 34 – Ciclo de partida.



Fonte: Adaptado de Michelotti (2008).

Estágio 1: O impulsor está na posição de repouso e o motor de partida sem corrente. A mola da chave magnética mantém a ponte de contato na posição de repouso.

Estágio 2: A chave de partida é acionada. A bobina de atracamento, a bobina de retenção da chave magnética, a bobina de campo e o induzido recebem corrente elétrica e então o eixo induzido começa a girar lentamente. O impulsor também gira e se desloca longitudinalmente, porque é montado no eixo induzido sobre estrias helicoidais.

Estágio 3: A ponte de contato da chave magnética liga imediatamente a bobina de campo e o induzido. O pinhão procura engrenar-se.

Estágio 4: A alavanca (ou garfo) está na sua posição final e o pinhão engrenado na coroa do motor a combustão. A ponte de contato liga imediatamente a bobina de campo principal e o motor de partida tem torque total. O torque transmitido pelo pinhão permite a ignição do motor a combustão.

4.1.1.1 O impulsor de partida.

O impulsor foi um invento patenteado em 1910 por Vincent Bendix, engenheiro nascido em Moline (EUA) em 1882. O invento de Bendix teve sua primeira aplicação em 1914 em um veículo Chevrolet, e utilizava somente a inércia do impulsor de partida e um estriado helicoidal no eixo induzido do motor de partida para realizar o engrenamento do pinhão com a coroa do volante do motor de combustão interna, por este motivo o impulsor de partida é, ainda hoje, muito conhecido no ramo automotivo pelo sobrenome do seu inventor, Bendix.(Michelotti, **Modelagem dinâmica 1-d com validação experimental: Estudo de caso no desenvolvimento de produto**, 2008).

Atualmente o impulsor é fabricado por diversas empresas de todo o mundo e pode ser definido como um sistema mecânico dotado de uma catraca que permite o giro livre somente em um sentido e o travamento do giro no sentido contrário.

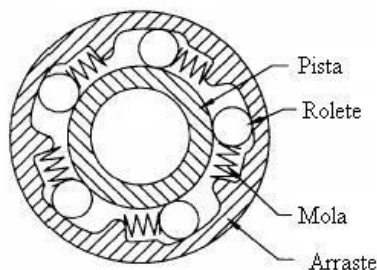
Tais funcionalidades visam:

- Promover à partida do motor a combustão, fornecendo torque quando o impulsor é acionado pelo eixo induzido do motor de partida e gira no sentido de travamento do sistema roda-livre;
- Evitar a transmissão da elevada rotação que ocorre quando o motor a combustão entra em ignição, para não danificar o motor de partida (centrifugação do motor elétrico).

No decorrer dos anos o sistema evoluiu e foram criados diferentes conceitos, dependendo da aplicação e nível de torque exigido.

Para motores a combustão de pequeno e médio porte, o sistema roda-livre mais comum é constituído por um perfil de cunha, conjuntos de roletes e molas que travam ou liberam o giro do pinhão dependendo do sentido de rotação e um eixo com um perfil cilíndrico denominado pista, conforme ilustrado na Figura 35.

Figura 35 – Sistema de roda-livre do impulsor convencional.

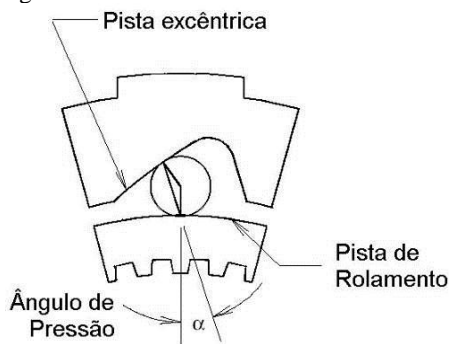


Fonte: Adaptado de Michelotti (2008).

O sistema é capaz de transmitir torque em um sentido e girar livremente no sentido oposto, sendo projetado para uma vida média de 50 mil partidas.

Seu princípio de funcionamento de transmissão de torque está baseado no atrito entre os roletes e as cunhas formadas por duas pistas, sendo uma delas uma pista de rolamento cilíndrica e a outra uma pista excêntrica formada por arcos circulares deslocados do centro de rotação, gerando um ângulo de pressão, conforme ilustrado na Figura 36.

Figura 36 – Perfil de came do sistema de roda livre convencional.



Fonte: Adaptado de Michelotti (2008).

As molas são responsáveis por manter os roletes sempre pressionados contra o perfil de cunha, fazendo com que o sistema seja capaz de travar prontamente quando solicitado.

Quando existe a rotação no sentido de travamento o ângulo de pressão faz com que o rolete trave e transmita torque, quando existe a rotação no sentido contrário o rolete tende a sair do perfil de cunha pelo atrito gerado pela pista cilíndrica fazendo com que nenhum torque seja transmitido.

Segundo Michelotti (2008), as forças de contato (radiais) são consideravelmente elevadas para a transmissão do torque requerido, resultando em tensões superficiais significativas nos pontos de contato e tensões tangenciais que exigem materiais com elevada dureza e bom acabamento superficial.

Durante o modo de funcionamento do impulsor em “roda-livre” há um movimento relativo entre as pistas interna e externa do impulsor de partida. Os principais modos de falha neste modo de operação são:

- O desgaste dos roletes e pistas;
- O posicionamento inadequado do rolete;
- A fadiga da mola.

5 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso tem como objetivo comparar a curva de fadiga do material dada pelo fabricante de matéria prima do POM obtida através de corpos de prova com a curva de fadiga obtida para o componente MP.

5.1 ESCOPO DO ESTUDO

O escopo deste estudo aborda o estudo do terceiro estágio de carga da MP denominado flecha “ f_2 ”, ou o estágio de carga cíclica que pode levar o componente a fadiga, ilustrada posteriormente na seção 5.2.1 através da Figura 40.

Com a intenção de separar as variáveis de influência e compreender a contribuição das cargas cíclicas sob a vida da MP a pesquisa não contempla a carga de montagem “ f_1 ” e a relaxação de tensão sofrida pela mesma ao longo do tempo, sendo que tanto os modelos analíticos, pelo método de elementos finitos e os ensaios experimentais consideram apenas a carga cíclica “ f_2 ”.

São desconsiderados também neste estudo os efeitos das cargas dinâmicas resultantes da velocidade de aplicação da carga sobre a MP.

5.1.1 Metodologia de trabalho

A flecha “ f_2 ”, sofrida pela MP durante seu ciclo de trabalho dentro do impulsor de partida, mas especificamente durante o momento de rodalivre não tem um valor conhecido, podendo variar conforme as condições do motor a combustão, devido a isso foram avaliados três valores distintos de “ f_2 ”, sendo eles denominados “ f_2^1 ”, “ f_2^2 ”, “ f_2^3 ”, conforme descrito através da Tabela 3 – Valores de “ f_2 ” adotados..

Tabela 3 – Valores de “ f_2 ” adotados.

Flecha	Valor (mm)
f_2^1	1,1
f_2^2	1,3
f_2^3	1,5

Para a realização do estudo modelos analíticos foram desenvolvidos utilizando as equações mostradas ao longo do Capítulo 2, tanto para estimar as cargas envolvidas, quanto para a estimativa da vida

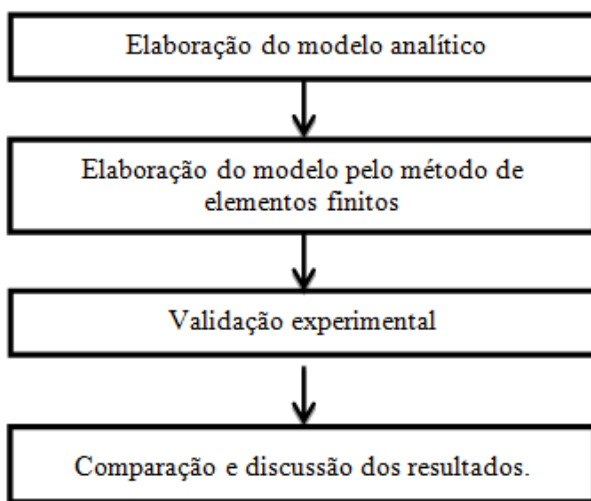
em fadiga do componente, reproduzindo as três condições de “ f_2 ”, descritas na Tabela 3 – Valores de “ f_2 ” adotados.

Também foi desenvolvido um modelo de elementos finitos com o objetivo de verificar e confirmar as informações obtidas através dos modelos analíticos, além de ser usado também, para obter o valor de concentração de tensão atuante sobre a MP.

Por fim, uma validação experimental foi realizada através de ensaios em bancada de teste, reproduzindo as condições de contorno utilizadas nos modelos elaborados e possibilitando assim, a comparação dos resultados.

A Figura 37 - Passos para a realização do estudo. ilustra o fluxo de trabalho utilizado nesta pesquisa.

Figura 37 - Passos para a realização do estudo.



5.2 A MP

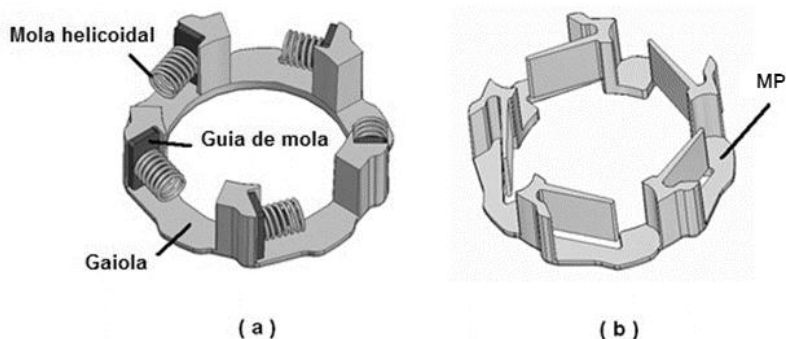
A MP é um componente que atua dentro do sistema de roda livre dos impulsores de partida, sendo desenvolvida com o intuito de substituir alguns componentes do sistema convencional.

Atualmente o sistema convencional é composto por uma gaiola de PA66; que atua como alojamento das molas e guias, molas helicoidais de aço mola, e guias de mola também de PA66.

Geralmente o sistema é composto por uma gaiola, cinco guias e cinco molas, existindo variações nas quantidades das molas e guias dependendo do valor de torque que o impulsor precisa transmitir.

A Figura 38 ilustra as diferenças entre os dois sistemas, onde o item “a” representa o sistema atual, e o item “b” representa a MP.

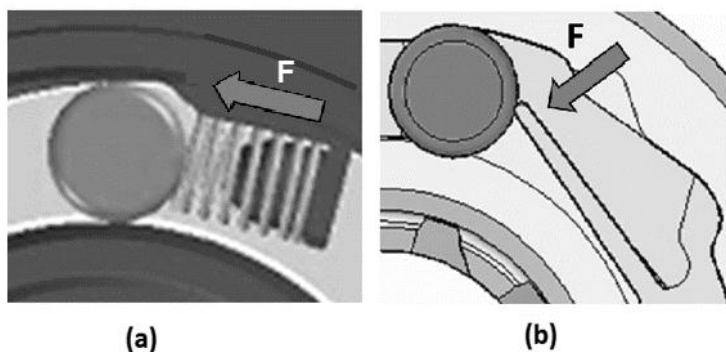
Figura 38 – (a) Sistema de roda livre atual, (b) MP



Conforme pode ser observado na Figura 38 a MP substitui as molas de aço por “vigas de polímero” ou molas de barra de flexão de secção transversal variável conforme definido por Niemann (2002).

Tais molas atuam diretamente sobre os roletes do sistema de roda-livre como uma mola de flexão, diferentemente do sistema atual em que as molas são de compressão, tal diferença é ilustrada na Figura 39.

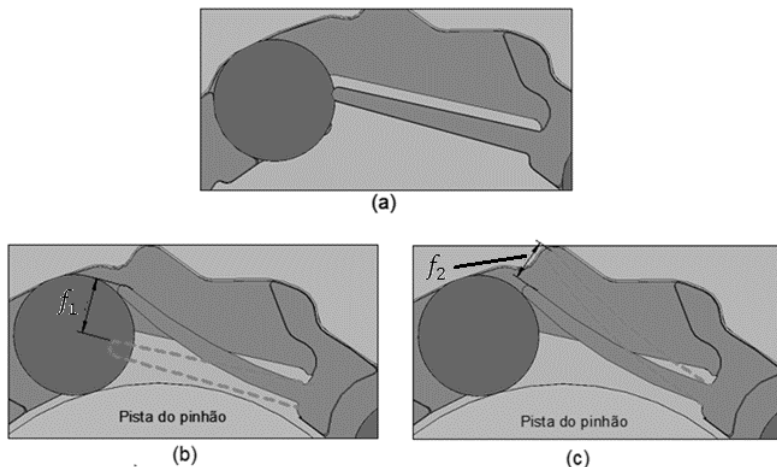
Figura 39 – (a) Carga no sistema de roda livre atual, (b) Carga na MP



5.2.1 O ciclo de trabalho

A MP passa por três estágios distintos de carga ilustrados na Figura 40.

Figura 40 – Estados de carga da MP: (a) estado de repouso, (b) estado de montagem, (c) estado de trabalho.



O primeiro estágio, ilustrado na Figura 40(a) é o estado de repouso onde não existe carga na MP.

O segundo estágio ilustrado na Figura 40(b), acontece durante a montagem do pinhão, onde a pista do pinhão (região em contato com os roletes) gera um deslocamento nos roletes para a região mediana da cunha e consequentemente também um deslocamento ou flecha de trabalho na MP denominado “ f_1 ”, esta carga gerada por “ f_1 ” que manterá o rolete pressionado contra a cunha e garantirá a função de travamento instantâneo requerida pelo impulsor de partida.

A flecha “ f_1 ” não sofre cargas cíclicas, pois o impulsor não será desmontado e remontado, porém, devido à natureza viscoelástica do material polimérico o valor da carga exercida pela mola sobre o rolete diminui em função do tempo, fenômeno este denominado relaxação de tensões.

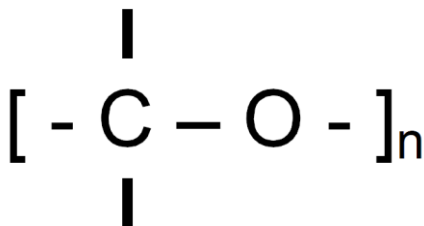
O terceiro estágio, ilustrado na Figura 40(c) acontece quando o impulsor, durante o ciclo de partida desempenha a função de roda-livre detalhada no capítulo 4 desta pesquisa, neste momento o rolete tem um

movimento de saída da cunha o que gera uma segunda flecha na MP , flecha essa denominado “ f_2 ”, esta por sua vez, é uma carga cíclica que se repete a cada nova partida no veículo, tendendo portanto a levar o componente a falha por fadiga.

5.2.2 Propriedades do material

A MP é fabricada em acetal homopolímero ou POM, que segundo Filho (2002), pode ser definido como um produto cuja estrutura molecular é caracterizada pela presença de ligações $-O-C-O-C-$ originadas da adição de unidades monoméricas com abertura das duplas ligações $C=O$ do tipo carbonílico. Sua estrutura química é ilustrada na Figura 41.

Figura 41 – Estrutura química do POM.



Fonte: Adaptado de Filho (2002)

O POM, seja ele homopolímero ou copolímero, é altamente cristalino possuindo excelentes propriedades, tais como elevado módulo de elasticidade, alta tenacidade, resiliência e alta temperatura de distorção.

Além disso, apresentam resistência à tração e compressão notavelmente altas se comparável aos termoplásticos de alto desempenho e diferentemente da maioria dos termoplásticos, os poliacetais mantêm valores elevados para estas características mesmo a altas temperaturas.

Entre outras características está sua cor branca translúcida que permite, portanto, que seja pigmentado, além da sua baixa capacidade de absorção de água (em 0,3% por 24 horas a 23°C).

Suas principais aplicações estão engrenagens, buchas, mancais, conexões e peças de alta precisão, sendo bastante aplicado na indústria de eletroeletrônicos, alimentícia e automobilística.

A Tabela 4 mostra as suas principais propriedades mecânicas.

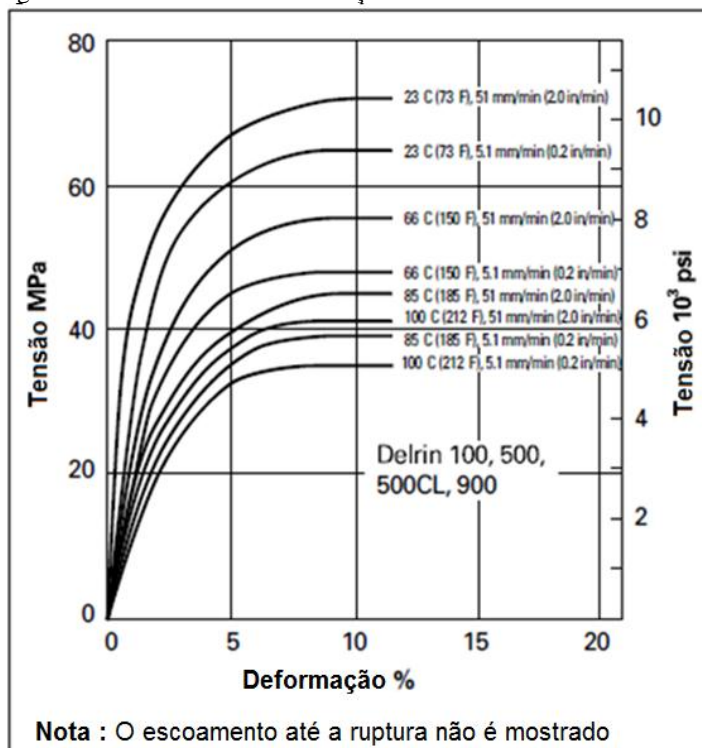
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do POM.

Propriedade	Norma de teste	Unidade	Valor
Tensão de escoamento	ISO 527	MPa (kpsi)	70 (10.1)
Deformação de escoamento	ISO 527	%	17
Deformação na ruptura	ISO 527	%	
50mm/min			40
Deformação nominal na ruptura	ISO 527	%	30
Módulo de elasticidade em tração	ISO 527	MPa (kpsi)	3100 (450)
Fluência em tração	ISO 899	MPa (kpsi)	
1h			2800 (406)
1000h			1600 (232)
Módulo de elasticidade em flexão	ISO 178	MPa (kpsi)	2900 (420)
Tensão de flexão a 3.5% de deformação	ISO 178	MPa (kpsi)	
			80 (11.6)
Charpy com entalhe	ISO 179/1eA	kJ/m ²	
-30°C (-22°F)			8
23°C (73°F)			9
Charpy sem entalhe	ISO 179/1eU	kJ/m ²	
-30°C (-22°F)			220
23°C (73°F)			300
Coefficiente de Poisson	-	-	0.35

Fonte: Adaptado de Dupont (2013)

Na Figura 42 é mostrada a curva de tensão deformação do POM sobre diferentes temperaturas e taxas de aplicação de carga, mostrando a variação que existe no material com a alteração nestes parâmetros.

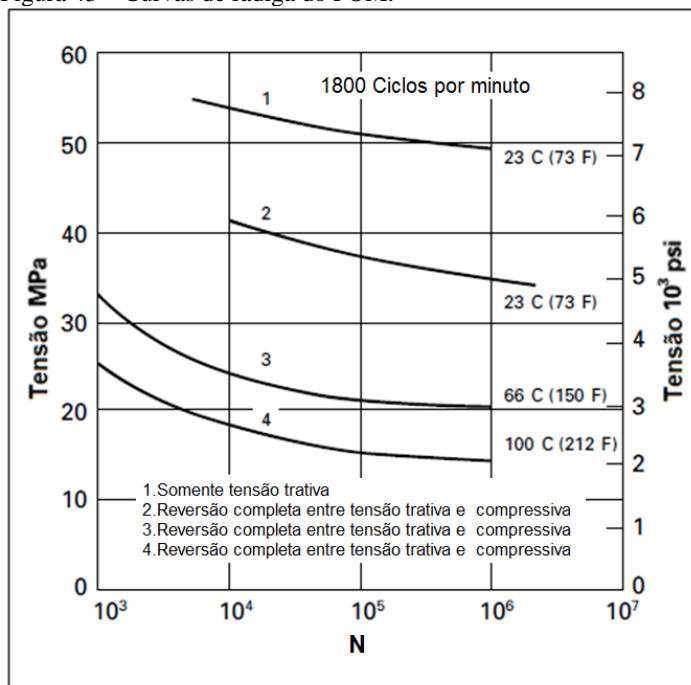
Figura 42 – Curvas tensão-deformação do POM.



Fonte: Adaptado de Dupont (2013)

A Figura 43 mostra as curvas em fadiga do material em várias condições de ensaio.

Figura 43 – Curvas de fadiga do POM.



Fonte: Adaptado de Dupont (2013)

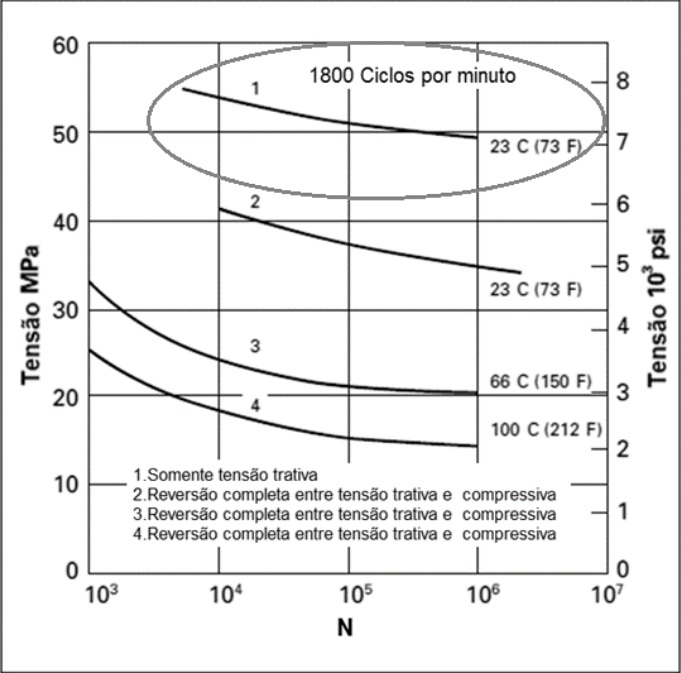
5.3 MODELO ANALÍTICO

A metodologia utilizada para elaboração do modelo analítico é a descrita na seção 2.2 desta pesquisa.

5.3.1 Obtenção da curva de fadiga e propriedades do material

A curva de fadiga adotada neste estudo é a curva circulada em vermelho e mostrada na Figura 44, pois se adequa melhor as condições de carga sofridas pela MP, já que a mesma não sofre um ciclo reversível como as demais mostradas na imagem.

Figura 44 – Curva de fadiga adotada nesta pesquisa



Fonte: Adaptado de Dupont (2013)

Um resumo das propriedades utilizadas neste estudo é descrito através da Tabela 5.

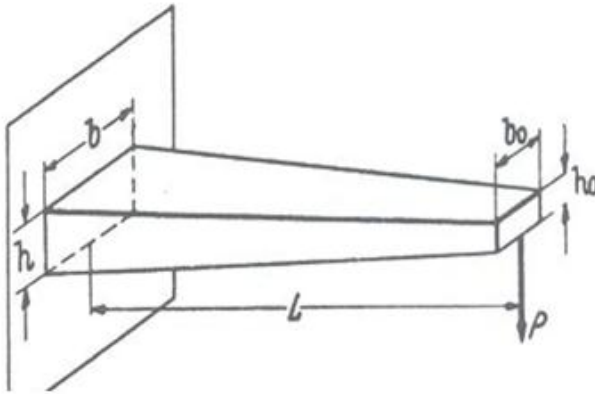
Tabela 5 – Propriedades adotadas por este trabalho.

Propriedade	Valor adotado
Tensão de escoamento (σ_Y)	70 (MPa)
Módulo de elasticidade (E)	2870 (MPa)
Coefficiente de Poisson (ν)	0,35
Tensão para vida de 10^3 (σ_n)	59(MPa)
Tensão para vida de 10^6 (σ_f)	49(MPa)

5.3.2 Determinação das solicitações envolvidas.

A MP é definida segundo Niemann (2002), como uma mola de barra de flexão de secção transversal variável e suas características são ilustradas na Figura 45.

Figura 45 – Principais características de uma de barra de flexão de secção transversal variável.



Fonte: Adaptado de Niemann (2002).

Sendo:

- b = altura da base;
- b_0 = altura da ponta;
- h = espessura da base;
- h_0 = espessura da ponta;
- L = comprimento total;
- P = Carga.

Ainda segundo Niemann (2002), A carga P pode ser obtida pela equação 27.

$$P = \frac{3 \cdot f \cdot E \cdot J}{q_1 \cdot L^3} \quad (27)$$

Sendo:

- f = Flecha de trabalho;
- E = Módulo de elasticidade do material;
- q_1 = Fator de redução de seção;
- J = Momento de inércia para a seção retangular.

O fator J é obtido pela equação 28, descrita abaixo:

$$J = \frac{b.h^3}{12} \quad (28)$$

Já o fator q_1 pode ser obtido através da consulta do resultado da equação 29 na Tabela 6.

$$q_1 = \frac{h_o}{h} \quad (29)$$

Tabela 6 – Valores de q_1 .

h_o/h	q_1
1,0	1,0
0,8	1,18
0,6	1,46
0,4	1,89
0,2	2,87

Fonte: Adaptado de Niemann (2002)

A tensão gerada pela carga P pode ser obtida através da equação 30.

$$\sigma = \frac{P}{W_f} \cdot L \quad (30)$$

Onde:

$$W_f = \frac{b.h^2}{6} \quad (31)$$

Os ciclos de carga gerados por “ f_2^1 ”, “ f_2^2 ”, “ f_2^3 ” serão denominados Cl_1 , Cl_2 e Cl_3 , ciclos estes classificados como ciclos pulsantes, conforme descrição dada no capítulo 2 desta pesquisa.

Aplicando-se as equações 28, 29, 30 e 31 juntamente com as condições de contorno da MP e as propriedades mecânicas do POM é possível obter os níveis de tensão atuantes em cada ciclo, denominadas σCl_1 , σCl_2 e σCl_3 respectivamente e mostradas através da Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de Tensão gerados por “ f_2^1 ”, “ f_2^2 ”, “ f_2^3 ”.

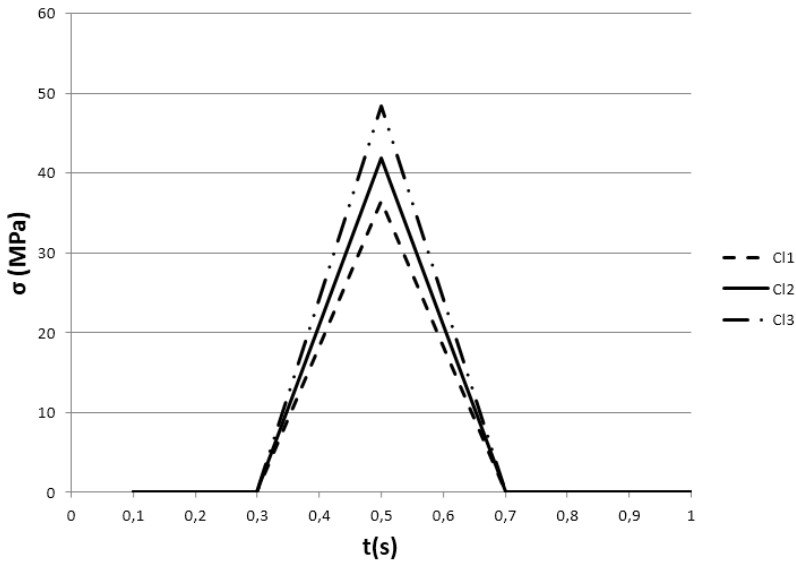
Flecha f (mm)	Valor da tensão σ_{Cl} (MPa)
f_2^1 (1,1)	36,47
f_2^2 (1,3)	41,86
f_2^3 (1,5)	48,31

Conhecendo os valores de tensão atuantes em cada ciclo é possível agora caracteriza-los através aplicação das equações 1, 2, 3, 4 e 5 também descritas no capítulo 2. Os resultados são mostrados através da Tabela 8 e também graficamente através da Figura 46.

Tabela 8 – Caracterização dos ciclos Cl_1 , Cl_2 e Cl_3 .

Propriedades	Cl_1	Cl_2	Cl_3
$\Delta\sigma$	36,47	41,86	48,31
σ_a	18,23	20,93	24,15
σ_m	18,23	20,93	24,15
R	0	0	0
A	1	1	1

Figura 46 –Ciclos Cl_1 , Cl_2 e Cl_3



5.3.3 Seleção do modelo de fadiga.

O modelo de alto ciclo descrito no capítulo 2 será adotado para esta pesquisa, pois, a MP já demonstrou em testes no motor vidas próximas a 10^5 ciclos, além, de não ser de interesse de este estudo conhecer em detalhes a fase de nucleação e propagação da trinca.

Aplicando as equações 9, 10, 11 e 12 do modelo de alto ciclo é possível obter a seguinte equação para o material:

$$N = \left(\frac{\Delta\sigma}{71,0408} \right)^{-37,24} \quad (32)$$

Devido ao ciclo aplicado à MP ser pulsante o valor de tensão considerado na equação 32 é o valor de $\Delta\sigma$ que, neste caso, é equivalente ao valor de tensão máximo (σ_{max}) aplicado ao componente.

5.3.4 Obtenção da curva de fadiga do componente

Através dos valores obtidos para σCl_1 , σCl_2 e σCl_3 é possível obter os correspondentes valores de N (vida esperada) para cada ciclo de carga, denominados NCl_1 , NCl_2 e NCl_3 e mostrados através da Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de NCl_1 , NCl_2 e NCl_3 .

Ciclo	Valores de NCl
σCl_1	58.511.619.347
σCl_2	377.027.546
σCl_3	1.693.442

A etapa seguinte é obter a curva corrigida do componente através da aplicação dos fatores de correção descritos na seção 2.2.4 desta pesquisa que são: a verificação da influência da tensão média, a aplicação dos fatores modificadores e a influência do fator de concentração de tensão sob a curva.

Em relação à análise da influência da tensão média descrita na seção 2.2.4.1 desta pesquisa, neste caso ela não é necessária, pois a curva de fadiga adotada para este estudo (mostrada anteriormente através da Figura 44) foi obtida através de um ciclo de carga pulsante similarmente ao ciclo sofrido pela MP, dispensando, portanto, a aplicação de qualquer correção.

Em relação à aplicação dos fatores modificadores descritos na seção 2.2.4.2 desta pesquisa, eles serão considerados unitários neste estudo, pois, como descrito anteriormente tais fatores são obtidos experimentalmente e não estão disponíveis para todos os materiais, sendo este o caso do POM.

Por fim em relação à influência do fator de concentração de tensão k_t , ele será obtido através de um modelo de elementos finitos descrito a seguir, sendo este aplicado como fator intensificador de carga, conforme sugerido por Rosa (2002) e descrito anteriormente na seção 2.2.4.3.

A aplicação de k_t como intensificador de carga altera, portanto, os valores iniciais de tensão obtidos anteriormente e mostrados através da Tabela 8 (σCl_1 , σCl_2 e σCl_3), que serão denominados após a aplicação de k_t como, $\sigma Cl'_1$, $\sigma Cl'_2$ e $\sigma Cl'_3$ e também consequentemente os valores de vida esperada ou os valores de NCl mostrados através da Tabela 9 que após a aplicação de k_t serão denominados como NCl' .

5.3.4.1 O modelo de elementos finitos

O modelo de elementos finitos foi elaborado com dois objetivos específicos:

O primeiro é avaliar os valores de tensão σCl_1 , σCl_2 e σCl_3 obtidos pelo modelo analítico e compara-los com os obtidos pelo modelo de elementos finitos, tendo, portanto uma visão das tensões globais no componente.

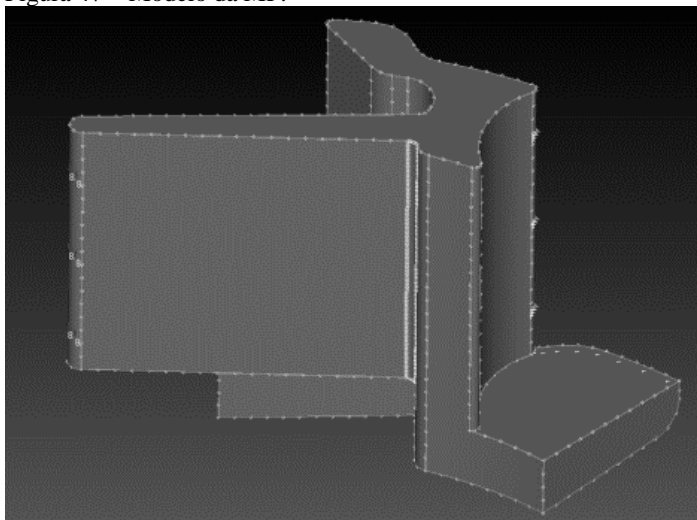
O segundo é obter o ponto e o valor de concentração de tensão k_t , tendo assim, uma visão das tensões locais no ponto crítico do componente.

Através destes dois resultados será possível obter os valores de $\sigma Cl'_1$, $\sigma Cl'_2$ e $\sigma Cl'_3$ e NCl'_1 , NCl'_2 e NCl'_3 , gerando uma aproximação melhor do comportamento real do componente em campo.

5.3.4.1.1 Restrições do modelo

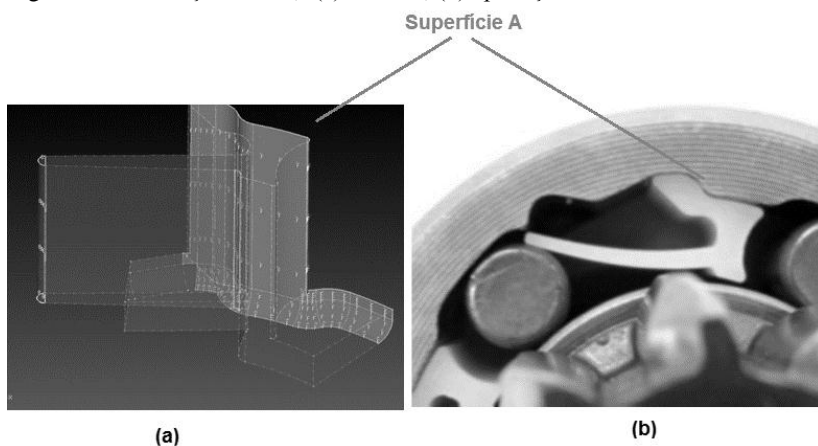
Com o objetivo de discretizar o modelo, apenas uma seção da MP foi modelada conforme mostrado através da Figura 47.

Figura 47 – Modelo da MP.



Na superfície “A” foi aplicada uma restrição denominada “fixa” restringindo todos os graus de liberdade da superfície e simulando a montagem da MP na contra peça, conforme ilustrado através da Figura 48.

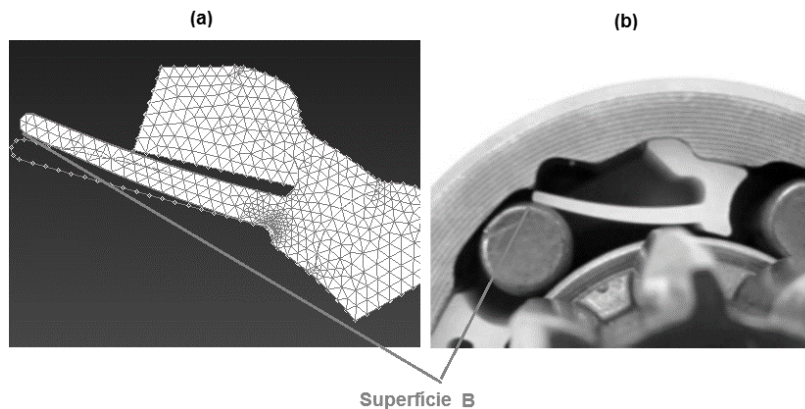
Figura 48 – Restrição “fixa”; (a) modelo, (b) aplicação.



5.3.4.1.2 Cargas do modelo

Na superfície “B” foram aplicados os deslocamentos correspondentes às flechas f_2^1 , f_2^2 e f_2^3 mostrados através da Tabela 3, conforme ilustrado através da Figura 49.

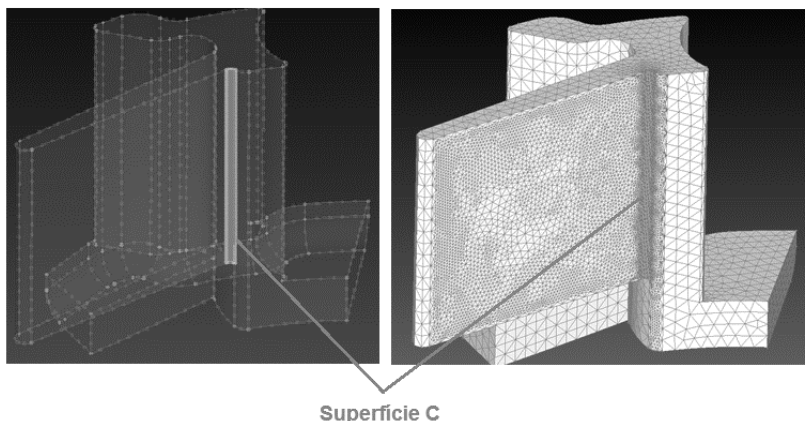
Figura 49 – Carga na MP; (a) modelo, (b) aplicação.



5.3.4.1.3 Elementos e malha utilizada no modelo

Para a construção dos modelos foram utilizados elementos tetraédricos de segunda ordem, conhecidos como T10, com um tamanho de malha de 0,05 mm na superfície de interesse “C”, por ser esta, a provável região de concentração de tensão e 0,6 mm no restante do modelo, conforme mostrado através da Figura 50.

Figura 50 – Malha do modelo.



5.3.4.1.4 Parâmetros da simulação

A simulação foi executada considerando um comportamento não linear em função dos grandes deslocamentos do modelo, para tanto foram utilizados os dados do material mostrados através da Tabela 5. Porém a não linearidade do material não foi considerado no modelo, sendo considerada posteriormente na seção 5.3.4.3.

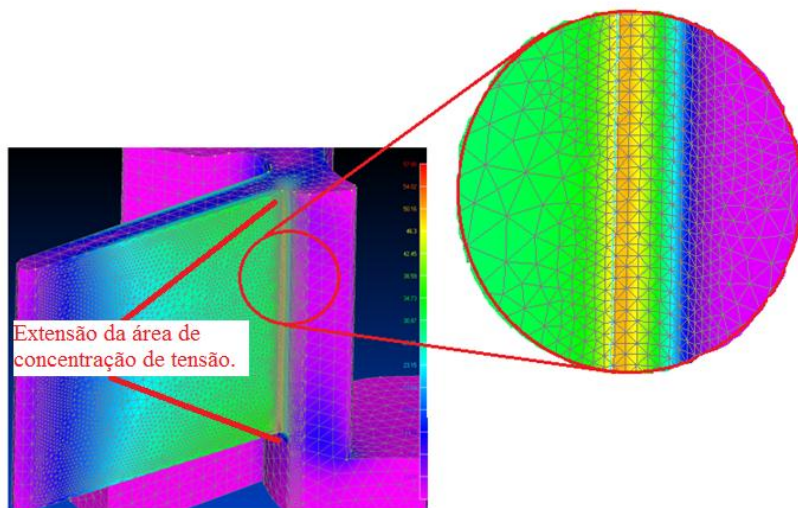
O critério utilizado para avaliação das tensões é o critério de Von Mises já que o POM é um material dúctil.

5.3.4.1.5 Resultados

Em uma avaliação qualitativa os resultados mostram uma boa relação com o comportamento esperado para o modelo, mostrando uma região de concentração de tensão na superfície “C” ilustrada anteriormente através da Figura 50.

Através da Figura 51 pode-se observar que a área de concentração de tensão está próxima a base da mola de flexão, estendendo-se por todo o seu comprimento.

Figura 51 – Região de concentração de tensão

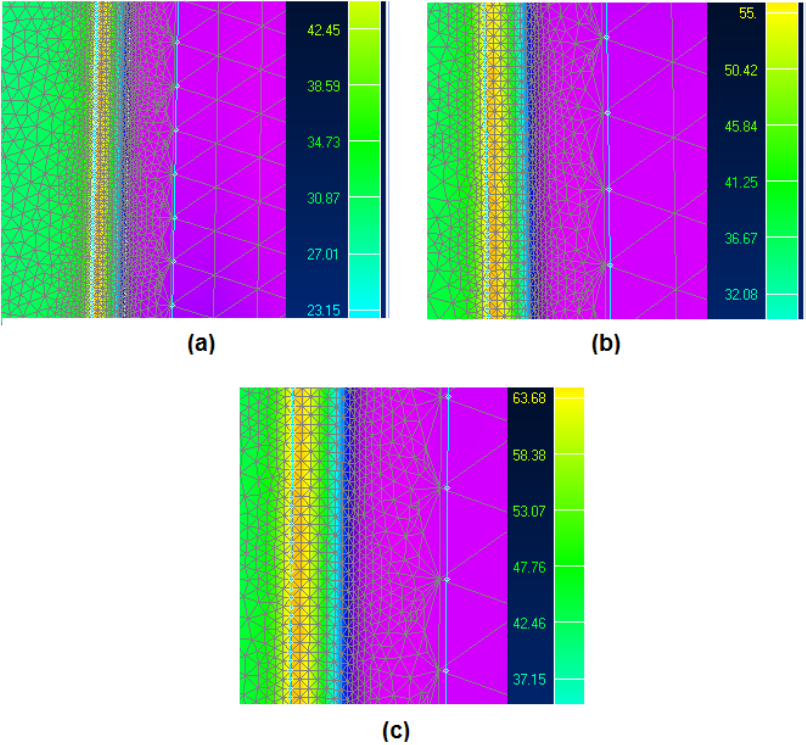


Em uma avaliação quantitativa, pode-se dividir os resultados em termos de tensões globais e tensões locais.

Em relação às tensões globais (na periferia da região de concentração de tensão), as grandezas encontradas pelo modelo de elementos finitos, denominadas σCl_{1mg} , σCl_{2mg} e σCl_{3mg} se aproximaram muito das obtidas pela equação 27 mostrados anteriormente através da Tabela 7.

A Figura 52 mostra o gradiente de tensões obtido para os modelos Cl_1, Cl_2 e Cl_3 sendo que os valores adotados para σCl_{1mg} , σCl_{2mg} e σCl_{3mg} foram uma média simples deste gradiente.

Figura 52 – Gradientes de tensão global para (a) Cl_1 , (b) Cl_2 e (c) Cl_3



Através da Tabela 10 é possível observar uma comparação entre os valores de tensão experimentais (σCl_1 , σCl_2 e σCl_3), os valores de tensão globais obtidos através do modelo de elementos finitos (σCl_{1mg} , σCl_{2mg} e σCl_{3mg}) e a correção entre eles.

Tabela 10 – Comparação dos modelos analíticos e MEF.

Ciclo	σCl (MPa)	σCl_{mg} (MPa)	Correlação
Cl_1	36,47	36	99%
Cl_2	41,86	43	97%
Cl_3	48,31	49,5	97,5%

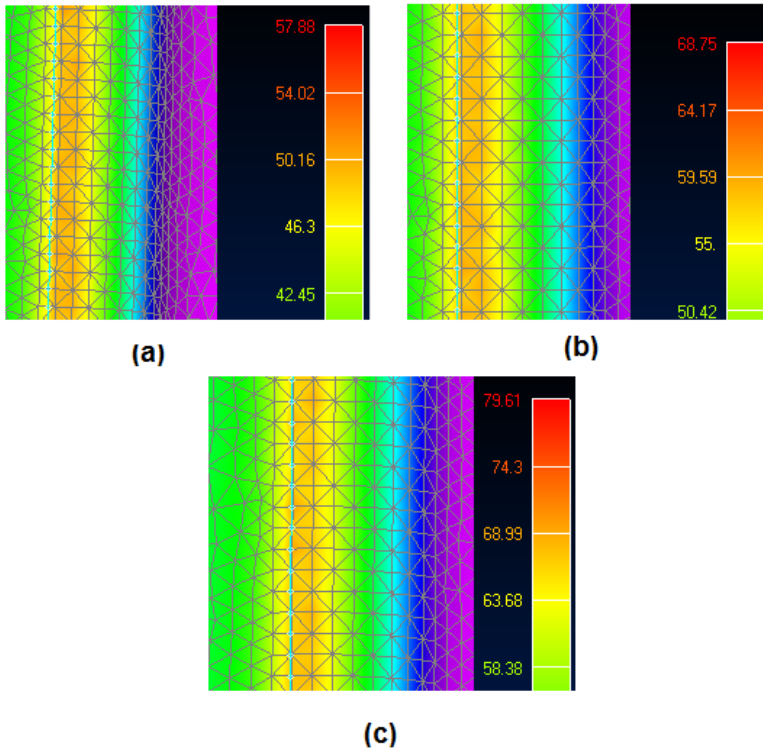
Através da Tabela 10 o primeiro objetivo do modelo de elementos finitos foi alcançado, confirmando as cargas iniciais sobre a MP.

Em termos de tensões locais no ponto crítico do componente o modelo apresentou níveis de tensões mais elevados na região de

concentração de tensão em comparação as tensões apresentadas na periferia, sendo possível então, através destes valores obter o fator de concentração de tensão k_t atuante na MP.

Através da Figura 53 é possível observar o gradiente de tensões locais obtidos para os modelos Cl_1 , Cl_2 e Cl_3 , sendo denominados σCl_{1ml} , σCl_{2ml} e σCl_{3ml} , determinados através de uma média simples dos gradientes encontrados.

Figura 53 – Gradientes de tensão local para (a) Cl_1 , (b) Cl_2 e (c) Cl_3



Na Tabela 11 é possível mostrar uma comparação entre os valores de tensão globais σCl_{1mg} , σCl_{2mg} e σCl_{3mg} , os valores de tensão locais σCl_{1ml} , σCl_{2ml} e σCl_{3ml} e o correspondente k_t para cada ciclo, que serão denominados $k_t Cl_1$, $k_t Cl_2$ e $k_t Cl_3$.

Tabela 11 – Comparação entre as tensões globais, locais e os valores de k_t

Ciclo	σCl_{mg} (MPa)	σCl_{ml} (MPa)	k_t
Cl_1	36	50	1,399
Cl_2	43	61	1,418
Cl_3	49,5	69	1,394

Com os valores de k_t mostrados através da Tabela 11 é possível obter, através de uma média simples, o valor médio de k_t denominado k_{tm} , sendo que o valor adotado para k_{tm} é de 1,4, alcançando assim o segundo objetivo do modelo de elementos finitos.

5.3.4.2 Realimentação do modelo analítico

Utilizando k_{tm} como fator intensificador de carga (conforme descrito anteriormente na seção 5.3.4 deste estudo) é possível realimentar o modelo analítico e obter os valores de $\sigma Cl'_1$, $\sigma Cl'_2$ e $\sigma Cl'_3$ mostrados através da Tabela 12.

Tabela 12 – Comparação entre σCl e $\sigma Cl'$

Ciclo	σCl (MPa)	k_{tm}	$\sigma Cl'$ (MPa)
Cl_1	36,47	1,4	51,06
Cl_2	41,86		58,60
Cl_3	48,31		67,40

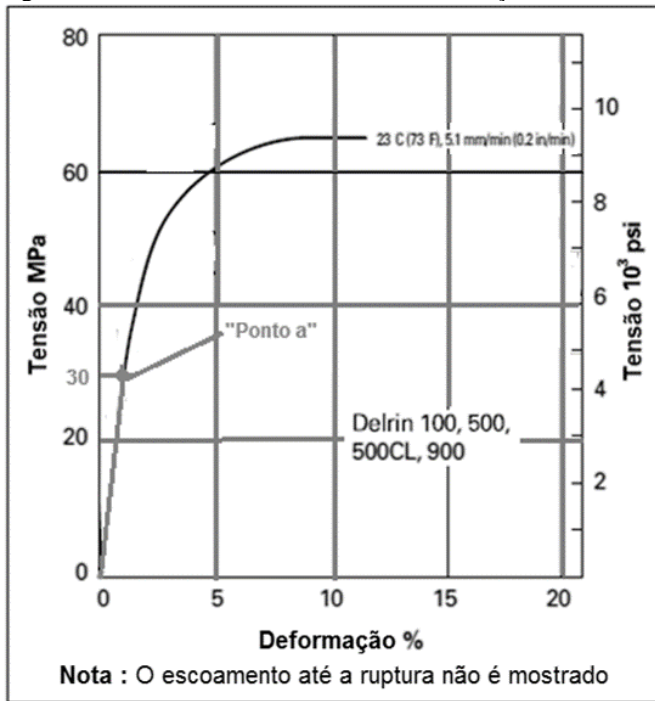
Pode-se observar através da Tabela 12 que os valores de tensão para $\sigma Cl'_1$, $\sigma Cl'_2$ e $\sigma Cl'_3$ geram grandezas na região não linear da curva do material, tais grandezas de tensão necessitam de correção para considerarem a não linearidade do material.

Para tanto se faz necessário à aplicação da regra de Neuber para avaliação da concentração de tensão em regimes elasto-plásticos descrita no anteriormente na seção 2.2.4.3.1.

5.3.4.3 Aplicação da regra de Neuber.

Pode-se observar que a curva tensão deformação do POM mostrada na Figura 54 é uma curva de comportamento não linear, porém, para fins de simplificação será adotado um comportamento linear até o ponto “a” ou até a tensão de 30 MPa região está onde a não linearidade da curva é muito pequena, podendo então ser desprezada.

Figura 54 – Parte linear da curva tensão-deformação do POM.



Fonte: Adaptado de Dupont (2013)

Para a obtenção dos valores das tensões $\sigma Cl'_1$, $\sigma Cl'_2$ e $\sigma Cl'_3$ corrigidos através da regra de Neuber, denominados $\sigma nCl'_1$, $\sigma nCl'_2$ e $\sigma nCl'_3$ foi utilizado uma abordagem gráfica para identificar o ponto de intersecção das hipérboles com a curva do material, para tanto, se fez necessário à obtenção da equação da curva do material, a extrapolação da parte linear da curva e a obtenção das equações da hipérbole para Cl_1 , Cl_2 e Cl_3 .

Com estas informações foi possível plotar todas as curvas em função das tensões e deformações e obter a intersecção entre elas.

5.3.4.3.1 Obtenção da equação da curva do material.

Como primeiro passo para obtenção da correção pela hipérbole de Neuber é necessário obter a equação da curva tensão deformação do material.

Para tanto, foram obtidos graficamente vários pontos de tensão e deformação da curva mostrada na Figura 54 e através destes pontos foi possível a obtenção da equação 33 descrita posteriormente, que aproxima de maneira satisfatória a curva do material na área de interesse.

$$\sigma = 191993\varepsilon^3 - 38925\varepsilon^2 + 2620,1\varepsilon + 4,2873 \quad (33)$$

5.3.4.3.2 *Extrapolação da parte linear da curva*

Como o segundo passo é necessário extrapolar a região elástica da curva a fim de obter o ponto de $\sigma_{máx}$ ou ponto inicial da parábola.

Para tanto, a equação 34 descrita a seguir e utilizada para obtenção do módulo de elasticidade foi utilizada:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (34)$$

Aplicando deformações conhecidas obtidas na região elástica da curva do material e o módulo de elasticidade adotado neste trabalho (descrito na Tabela 5) foi possível extrapolar a reta na região elástica do material simulando um material perfeitamente elástico.

5.3.4.3.3 *Construção da hipérbole de Neuber.*

Utilizando as tensões de σ_{Cl_1} , σ_{Cl_2} e σ_{Cl_3} (mostrados na Tabela 12) e o fator de concentração de tensão k_{tm} (também mostrado na Tabela 12) é possível construir as hipérboles de Neuber para os ciclos Cl_1, Cl_2 e Cl_3 e através disto obter os valores de $\sigma nCl'_1$, $\sigma nCl'_2$ e $\sigma nCl'_3$.

Abaixo são apresentadas as equações das hipérboles para cada ciclo de trabalho. A equação 35 representa a hipérbole de Neuber para o ciclo Cl_1 , a equação 36 para o ciclo Cl_2 e a equação 37 para o ciclo Cl_3 .

$$\sigma_{máx} \cdot \varepsilon_{máx} = 0,9083 \quad (35)$$

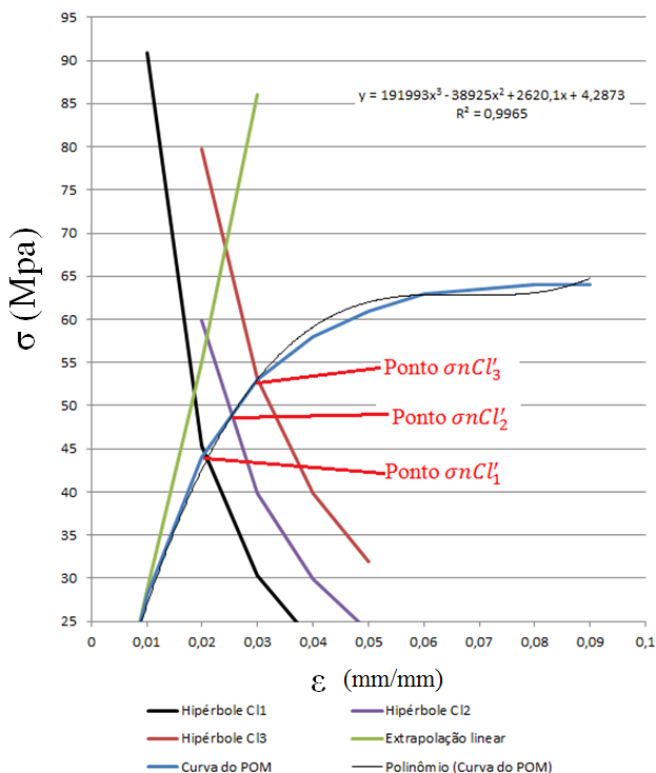
$$\sigma_{máx} \cdot \varepsilon_{máx} = 1,1966 \quad (36)$$

$$\sigma_{máx} \cdot \varepsilon_{máx} = 1,5938 \quad (37)$$

5.3.4.3.4 Plotagem das curvas e obtenção da intersecção

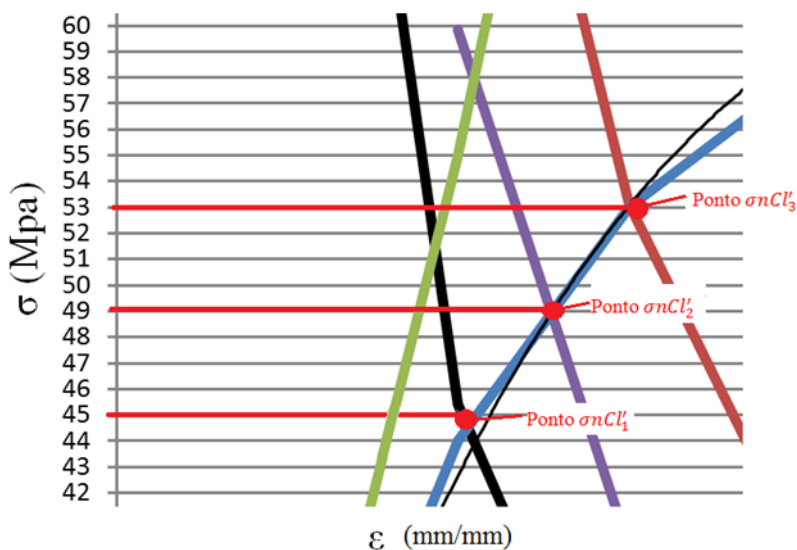
Através da Figura 55 é possível verificar as curvas da extrapolação linear, a curva aproximada do material e as hipérboles de Neuber plotadas em função das tensões e deformações, sendo possível também, visualizar as intersecções das hipérboles Cl_1 , Cl_2 e Cl_3 com a curva do material e obter, portanto, os pontos $\sigma nCl'_1$, $\sigma nCl'_2$ e $\sigma nCl'_3$.

Figura 55 – Plotagem das curvas obtidas.



Com o refinamento da escala do gráfico na região de interesse é possível obter os valores de tensão para $\sigma nCl'_1$, $\sigma nCl'_2$ e $\sigma nCl'_3$ conforme ilustrado na Figura 56.

Figura 56 – Tensão nos pontos $\sigma_{Cl'_1}$, $\sigma_{Cl'_2}$ e $\sigma_{Cl'_3}$



Os valores de tensão obtidos analiticamente (σ_{Cl}), os valores obtidos com a aplicação direta de k_{tm} (σ_{Cl}') e os valores obtidos com a consideração da não linearidade do material através da regra de Neuber (σ_{nCl}') são comparados através da Tabela 13.

Tabela 13 – Comparação entre σ_{Cl} , σ_{Cl}' e σ_{nCl}'

Ciclo	σ_{Cl} (MPa)	σ_{Cl}' (MPa)	σ_{nCl}' (MPa)
Cl_1	36,47	51,06	45
Cl_2	41,86	58,60	49
Cl_3	48,31	67,60	53

É possível perceber a redução no valor das tensões encontradas para $\sigma_{nCl'_1}$, $\sigma_{nCl'_2}$ e $\sigma_{nCl'_3}$ em relação aos valores obtidos para $\sigma_{Cl'_1}$, $\sigma_{Cl'_2}$ e $\sigma_{Cl'_3}$, o que mostra que tais valores consideram a não linearidade da curva do material e podem, portanto, ser utilizados para obtenção dos valores de estimativa de vida corrigidos ($N_{Cl'_1}$, $N_{Cl'_2}$ e $N_{Cl'_3}$).

Pode-se agora reescrever a Tabela 9 utilizando os valores de $\sigma_{nCl'_1}$, $\sigma_{nCl'_2}$ e $\sigma_{nCl'_3}$ como tensões de entrada para a equação 27.

Os resultados encontrados são apresentados através da Tabela 14 onde é feita uma comparação entre os valores de NCl e NCl' , mostrando grande redução na expectativa de vida do componente nos três ciclos de trabalho.

Tabela 14 – Valores de NCl_1 , NCl_2 e NCl_3 .

Ciclo	Valores de NCl	Valores de NCl'
Cl_1	58.511.619.347	23.746.792
Cl_2	377.027.546	1.000.000
Cl_3	1.693.442	54.000

5.4 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

A validação experimental foi executada utilizando um dispositivo de testes projetado para produzir os deslocamentos sobre a MP nos ciclos Cl_1 , Cl_2 e Cl_3 descritos na Tabela 3, tal dispositivo é acoplado a uma bancada de ensaios capaz de reproduzir o ciclo de roda livre dos impulsores de partida denominada “bancada de desacoplamento”.

A bancada possui controles onde é possível determinar a velocidade de rotação do eixo e monitorar o torque necessário para girá-lo, ela é ilustrada na Figura 57.

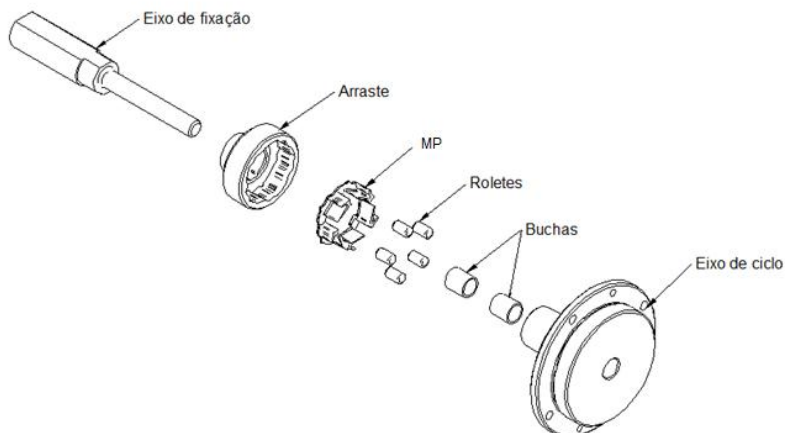
Figura 57 – Bancada de desacoplamento.



5.4.1 O dispositivo de testes.

O dispositivo de testes tem o objetivo de reproduzir comportamento do sistema impulsor em roda-livre ou, em outras palavras, a flecha “ f_2 ” da MP, tal dispositivo é ilustrado na Figura 58.

Figura 58 –Dispositivo de testes.



Ele é composto por vários componentes com funções e características distintas, uma descrição destes componentes é dada abaixo:

- **Eixo de fixação:** Responsável da fixação do dispositivo na bancada de ensaios e também por mancalizar todo o sistema;
- **Arraste:** Responsável pelo alojamento e fixação da MP;
- **MP:** Componente a ser ensaiado;
- **Roletes:** Responsáveis por transmitir o movimento gerado pelo came do eixo de ciclo a MP;
- **Buchas:** Responsáveis pela mancalização entre o eixo de fixação e o eixo de ciclo;
- **Eixo de Ciclo:** Responsável por ciclar a MP através dos deslocamentos gerados nos roletes pelo perfil de came.

5.4.1.1 Funcionamento do dispositivo.

O eixo de ciclo possui um perfil de came com dois diâmetros diferentes, denominados D_a , que é o diâmetro de acionamento e D_r , que é o diâmetro de repouso.

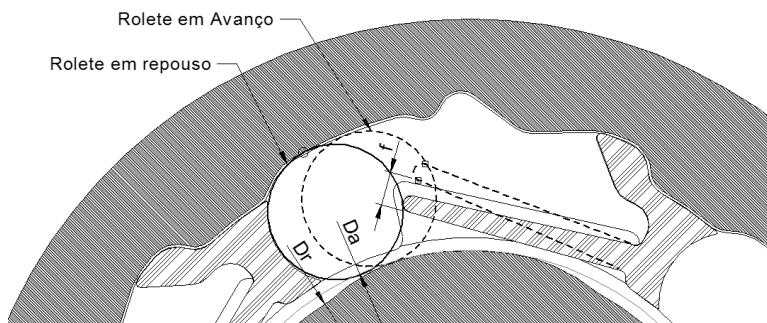
A cada rotação do eixo a MP sofrerá um ciclo de carga quando D_a entrar em contato com o rolete, fazendo com que ele se mova e provoque uma flecha f na MP, gerando, portanto, uma tensão equivalente.

Por outro lado o rolete nunca entrará em contato com D_r o que lhe permite um tempo de repouso retornando a tensão nula e completando um ciclo de carga.

Alterando-se o diâmetro dos roletes é possível alterar o valor de f permitindo, portanto, a reprodução experimental dos ciclos Cl_1 , Cl_2 e Cl_3 .

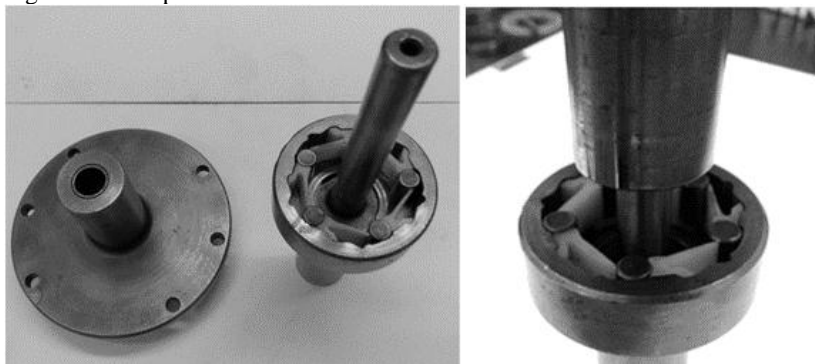
Uma ilustração destas características e feita através da Figura 59.

Figura 59 – Características do funcionamento do dispositivo de testes.



O dispositivo já com a MP montada é mostrado através da Figura 60, onde os valores de f_2 foram verificados com o auxílio de um paquímetro, ficando extremantes próximos aos valores descritos através da Tabela 3, tendo, portanto suas diferenças desconsideradas.

Figura 60 – Dispositivo de testes com MP.



5.4.2 Metodologia dos testes

Através do controle da rotação do eixo denominada R_e e o tempo de ensaio denominado t_e é possível obter, através da equação 38, o número de ciclos sofridos pela MP durante o teste, denominado N_e , sendo que:

$$N_e = R_e \cdot t_e \quad (38)$$

Com o objetivo de evitar a fadiga térmica descrita anteriormente na seção 3.1.3, a rotação adotada para os testes será de 400 RPM gerando, portanto 400 ciclos por minutos sobre a MP, quantidade esta, que é bem menor do que o valor de 1800 ciclos por minuto usado para a determinação da curva de fadiga do POM, ilustrada na Figura 44.

Através do monitoramento do torque no eixo de ciclo, variável essa controlada pela bancada, é possível verificar a falha da MP, já que quando existe a ruptura da mesma a pressão sobre os roletes é nula reduzindo assim o torque necessário para girar o eixo de ciclo ou travando totalmente o sistema, pois o rolete fica “solto”. Estes dois indicadores serão usados para indicar a falha do sistema.

5.4.2 Configurações dos testes.

Foram testados cinco componentes para cada configuração de f_2 , gerando, portanto, quinze testes, através da Tabela 15 é possível verificar os detalhes dos testes.

Tabela 15 – Detalhes dos testes

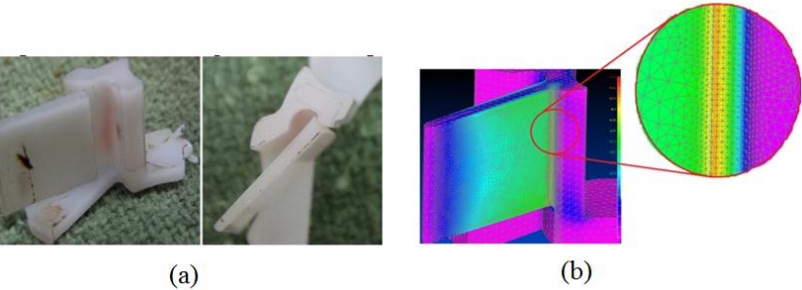
f_2	Valor de f_2 (mm)	Quantidade de ensaios	Ciclos por minuto
f_2^1	1,1	5	400
f_2^2	1,3		
f_2^3	1,5		

5.4.4 Resultados obtidos.

De maneira geral, amostras da MP apresentaram uma fratura da mola em todos os 15 ensaios, fratura esta que ocorreu na região de concentração de tensão apontada na Figura 50, indicando boa correlação com o modelo de elementos finitos mostrado na seção 5.3.4.1.

O resultado experimental é comparado com o modelo de elementos finitos através da Figura 61.

Figura 61 – (a) Fratura experimental (b) Região da fratura apontada pelo MEF.



Através da Tabela 16 é possível verificar os resultados obtidos para N_e em cada ciclo de teste, resultados estes denominados N_eCl_1 , N_eCl_2 e N_eCl_3 , é possível também observar valores de t_e e um valor médio de N_e , denominado N_{em} .

Tabela 16 – Resultados dos ensaios

Ciclo	Ensaio	t_e (min)	N_e	N_{em}
$N_e Cl_1$,	1	470	188000	172500
	2	400	160000	
	3	350	140000	
	4	500	200000	
	5	520	174000	
$N_e Cl_2$	6	90	36000	27120
	7	72	28800	
	8	55	22000	
	9	70	28000	
	10	52	20800	
$N_e Cl_3$,	11	20	8000	7120
	12	19	7600	
	13	15	6000	
	14	18	7200	
	15	17	6800	

Os resultados adotados serão os valores de N_{em} para cada ciclo de teste denominados $N_{em}Cl_1$, $N_{em}Cl_2$ e $N_{em}Cl_3$.

5.5 COMPARAÇÕES E DISCUÇÃO DOS RESULTADOS

É possível agora fazer uma comparação entre os resultados obtidos pelo modelo analítico com auxílio do modelo de elementos finitos e da regra de Neuber (NCl'_1 , NCl'_2 e NCl'_3) e os resultados obtidos experimentalmente através dos testes em bancada ($N_{em}Cl_1$, $N_{em}Cl_2$ e $N_{em}Cl_3$).

É possível ainda através da equação 39 obter a razão entre os valores de N' e N_{em} denominada RN , demonstrando assim a dispersão entre os resultados.

$$RN = \frac{N'}{N_{em}} \quad (39)$$

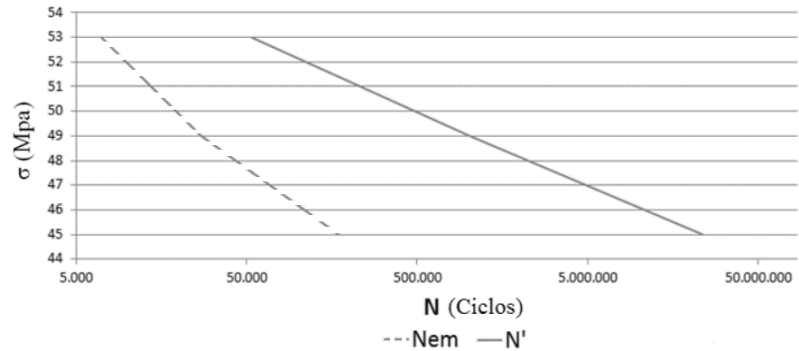
Tais comparações são mostradas através da Tabela 17.

Tabela 17 – Comparação entre N' e N_{em}

Ciclo	Valores de N'	Valores de N_{em}	RN
Cl_1	23.746.792	172.500	137,66
Cl_2	1.000.000	27.120	36,87
Cl_3	54.000	7.120	7,5

Através da Figura 62 é possível verificar graficamente em escala logarítmica (base 10) a comparação entre os dois resultados.

Figura 62 – Comparação gráfica entre N' e N_{em}



Através dos resultados é possível observar que os valores de N_{em} obtidos experimentalmente foram muito menores em comparação aos obtidos analiticamente em N' , porém, ao analisar os valores obtidos para RN é possível verificar que as curvas tendem a convergir quando a tensão tende ao infinito similarmente ao mostrado na Figura 18 na seção 2.2.4.2 desta pesquisa.

É possível também, através da Tabela 17 e da Figura 62 obter as equações logarítmicas para as curvas N' (40) e N_{em} (41) mostradas abaixo, lembrando que, k_t foi utilizado neste estudo como intensificador de carga, o que significa que a equação da curva para N e N' é a mesma já que k_t não altera a curva de fadiga do material.

$$\sigma = -2,488 * LN(N') + 74,816$$

(40)

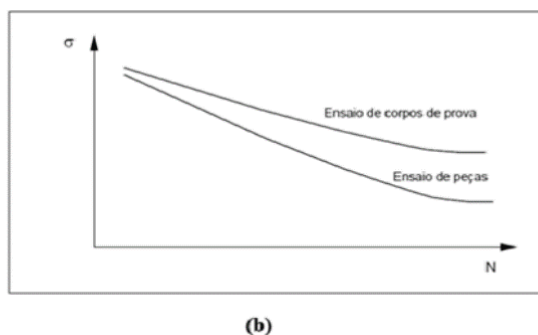
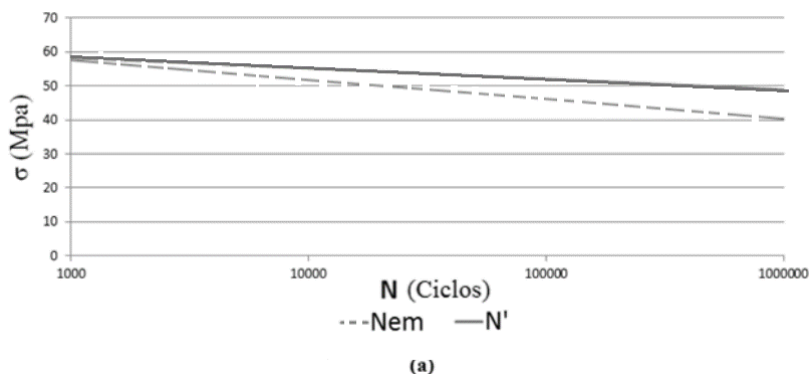
$$\sigma = -1,314 * LN(N_{em}) + 67,259$$

(41)

Ao extrapolar as curvas obtidas para N' e N_{em} através destas equações, o ponto de intersecção entre as curvas é encontrado em

aproximadamente em 10^3 ciclos, como pode ser observado na Figura 63, que ilustra também a semelhança entre os resultados obtidos e a curva apresentada na Figura 18.

Figura 63 – Comparação entre os resultados (a) e a figura 17(b).

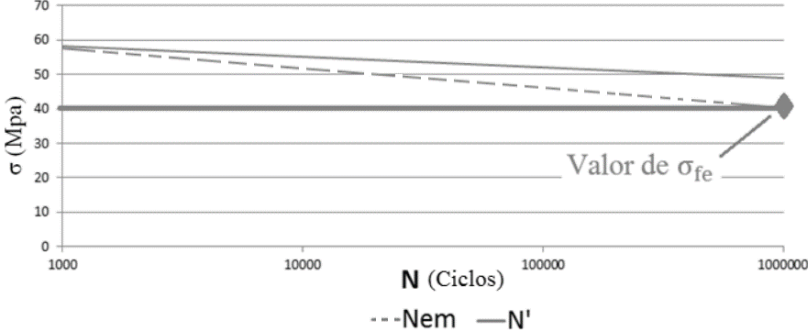


Tal semelhança indica a influência dos fatores de correção sob a curva do componente, sendo que este estudo verificou apenas a influência de k_t , porém, é possível através das equações 40 e 41 plotadas na Figura 63 verificar a diferença entre a curva sem os fatores de correção (Curva N') e a curva com os fatores de correção (curva N_{em}), já que como hipótese pode-se considerar a curva experimental como a curva que já contém todos os fatores de correção relevantes mesmo não conhecendo o valor individual deles.

Através dessa hipótese é possível também obter um fator de correção único para curva do material, utilizando o valor de σ_f encontrado na curva N_{em} , que será denominado σ_{fe} .

Analisando a curva de N_{em} é possível verificar através da Figura 64 que o valor de σ_{fe} fica em torno de 40 MPa.

Figura 64 – Análise da curva N_{em} em comparação a curva N' .



Aplicando-se a equação 42 descrita a seguir é possível encontrar um valor de correção único denominado k_{un} que pode ser utilizado para a correção da curva do material, na equação 17, descrita na seção 2.2.4.2 desta pesquisa.

$$k_{un} = \frac{\sigma_{fe}}{\sigma_f} \tag{42}$$

Através da Tabela 18 é possível comparar o valor de σ_f indicado na tabela 5 da seção 5.3.1 com σ_{fe} e consequentemente o valor obtido para k_{un} através da equação 38.

Tabela 18 – Comparação entre σ_f , σ_{fe} e k_{un} .

σ_f (MPa)	σ_{fe} (MPa)	k_{un}
49	40	0,8163

Com a obtenção de k_{un} através da comparação da curva do material (equação 40) e a curva do componente (equação 41) o objetivo principal do estudo foi alcançado.

6 CONCLUSÕES

Em relação ao tema fadiga foi possível concluir através desta pesquisa que os modelos e equacionamentos disponíveis na literatura são de grande utilidade para estimar a vida em fadiga de um determinado componente, porém é necessário que o material na qual o componente seja constituído esteja bem caracterizado e tenha todas as informações necessárias para satisfazer a equações utilizadas. Caso contrário será necessário executar testes ou métodos alternativos tais como o MEF para obter estas informações exigindo, na maioria das vezes, grande quantidade de recursos financeiros e tempo de trabalho.

Em relação aos polímeros, foi possível concluir através dos ensaios com o POM que tais materiais envolvem uma grande complexidade em termos de comportamento mecânico, sendo de fundamental importância a avaliação de todas as variáveis envolvidas nos ensaios, já que suas propriedades mecânicas se alteram facilmente, podendo gerar resultados errôneos e interpretações precipitadas.

Em relação ao componente MP a pesquisa ampliou o conhecimento sobre o mesmo, sendo possível destacar:

- A obtenção da equação de fadiga para o componente MP (equação 41), que pode ser utilizada para estimar o valor real de f_2 (flecha cíclica de trabalho do componente MP) em sua aplicação no motor à combustão;
- A obtenção do valor de k_t atuante sob a MP, de maneira que o projeto pode ser alterado na região crítica para reduzir este valor e aumentar a durabilidade do sistema, usando como parâmetro de comparação, os modelos de elementos finitos aqui desenvolvidos.
- A obtenção do valor de k_{un} , sendo possível através dele à estimativa da vida em fadiga do componente MP com parâmetros obtidos através de ensaios.
- A grande sensibilidade do componente MP a pequenas variações de deslocamento, fato este comprovado pelos diferentes níveis de N obtidos com uma variação de 0,5mm do deslocamento da mola.

Como sugestão de continuidade desta pesquisa pode-se abordar os seguintes pontos:

- A avaliação da vida em fadiga do componente MP em outras condições de teste, tais como em altas temperaturas e em velocidade de aplicação de carga diferentes, com o intuito de verificar a influência de tais variáveis no valor de k_{un} ;

- A utilização das equações e resultados obtidos nesta pesquisa para avaliação da vida em fadiga do componente MP no motor a combustão;
- A aplicação do modelo de baixo ciclo para a avaliação em maior detalhe da região de deformação plástica;
- A estimativa do efeito da inércia sob as cargas envolvidas não componente MP;
- A avaliação da vida em fadiga sob outros critérios de falha, como, TRESCA por exemplo.
- A avaliação da superposição dos efeitos-critérios de falha sob a vida em fadiga do componente MP.
- Um estudo para determinar o ponto de transição entre fadiga térmica e mecânica do componente MP.

REFERÊNCIAS

SANTOS, Rui; MARTINS João Guerra. **Materiais de construção, plásticos**, 2º edição, 2010.

LEMONS, Carlos Alberto Duarte de. **Análise de fadiga em risers flexíveis**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese ,COPPE, 2005.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas, uma abordagem integrada**. EDITORA ARTMED, 2000.

ABRAHÃO, Rodrigo Rebello Ribeiro; BITTENCOURT, Carolina; TSURUTA, Karina Mayumi; RADE Raquel Santini Leandro . **Fadiga de materiais: Uma revisão bibliográfica**. Minas Gerais, Universidade Federal de Uberlândia :XII Seminário de iniciação científica, 2008.

VERVOORT Stephan; WURMANN, Gerd; **History of fatigue**
Disponível em: [HTTP://www.atzonline.com.br](http://www.atzonline.com.br), acesso em :29/05/2012.

ROSA, Edison da. **Análise de resistência mecânica, Mecânica da fratura e fadiga**, Universidade Federal de Santa Catarina. 2002.

COLIM, Glenda Maria. **Fadiga dos materiais**. São Paulo: Escola Politécnica da universidade de São Paulo. 2006.

CUTRIM, Túlio Humberto Pinheiro; LOURENÇO, Rhaicon Ramos. **Análise de fadiga de pinos de cisalhamento do anel de regulação de unidades hidrogeradoras**. Brasília: Universidade de Brasília, 2010.

SOUZA, Erich Douglas de, **Análise do efeito da tensão média sobre a resistência á fadiga do aço ASTM A743 CA6NM**, Brasília: Universidade de Brasília, 2011

CANEVAROLO, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**, 3º edição, São Paulo, 2010.

SOUZA, Evandro Elias de, **Análise do comportamento em fadiga do POLI (fluotero de vinilideno)(PVDF)**, Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

OLIVER, Nelson Cárdenas. **Análise de falha da camada polimérica externa de cabos umbilicais**, Tese, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

FILHO, Paulo Roberto Carvalho Coelho . **Comportamento dos termoplásticos POM e PBT em contato com combustíveis**. Dissertação. Belo Horizonte: Universidade Pontifícia universidade católica. 2002.

SAUER, J.A.; RICHARDSON, G.C., **Fatigue of polymers**, Rutgers university, USA, 1980.

MICHELOTTI, Alvaro Canto. **Modelagem dinâmica 1-d com validação experimental: Estudo de caso no desenvolvimento de produto**. Dissertação. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. 2008.

NIEMANN, Gustav. **Elementos de Máquinas**, 8a reimpressão, São Paulo: Editora Edgar Blücher LTDA. 2002.

DUPONT, Derlin. **Desing Guide Module 3**. Disponível em: <http://plastics.dupont.com/plastics/pdflit/americas/delrin/230323c.pdf>, Acesso em: 10/08/13.

STUART, Barbara H. **Polymer Analysis**. University of technology, Sydney, Australia, 2003.

CHEREMISINOFF, Nicholas. **Consice encyclopaedia of polymers**. Elsevier group, 2001.

BALAZS, C.F. **Mechanical design and notch sensitivity of molding materials**. Paper of ASME publication, 1965.

FLORY, Paul J. **Principles of polymer chemistry**, Cornell university press, 6ª Edição, 1995.

MANSON, S.S ,HALFORD, G.R. **Fatigue and durability of structural materials**, ASM international, 2006.

SURESH, S. **Fatigue of materials**, University of Cambridge , 2ª Edição, 1998.

LEE, Yung-Li; PAN, Jwo ; HATHAWAY, Richard ; BARKEY, Mark. **Fatigue testing and analysis**, Elsevier Inc. , 2005.

CALLISTER, William D; RETHWISCH, David.G. **Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach**. University of Cambridge , 3ª Edição, 2007.

SCHIJVE, Jaap. **Fatigue of Structures and Materials**, Springer, 2ª Edição, 2003.